



#3

PATENT  
590146-2000

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

Applicant : Akira YABE  
Serial No. : 09/778,172  
Filed : February 7, 2001  
For : **METHOD AND APPARATUS FOR OPTIMIZING  
OPTICAL SYSTEM AND RECORDING MEDIUM  
WITH PROGRAM FOR OPTIMIZING OPTICAL  
SYSTEM**  
Examiner : N/A  
Group Art Unit : 2652

745 Fifth Avenue  
New York, New York 10151

**EXPRESS MAIL**

Mailing Label Number: EL742669152US

Date of Deposit: April 3, 2001

I hereby certify that this paper or fee is being deposited with the United States Postal Service "Express Mail Post Office to Addressee" Service under 37 CFR 1.10 on the date indicated above and is addressed to: Assistant Commissioner for Patents, Washington, D.C. 20231.

Charles Jackson  
(Typed or printed name of person mailing paper or fee)

Charles Jackson  
(Signature of person mailing paper or fee)

**FILING OF PRIORITY APPLICATION  
TO PERFECT CLAIM FOR PRIORITY**

Assistant Commissioner for Patents  
Washington, D.C. 20231

Sir:

A claim for priority under the provision of 35 U.S.C. §119 is hereby entered in the above-identified application.

In support thereof, enclosed is a certified copy of Japanese Patent Application No.  
2000-335631 filed November 2, 2000.

Entrance of the priority claim is respectfully solicited.

Respectfully submitted,

FROMMER LAWRENCE & HAUG LLP  
Attorneys for Applicant

By   
Matthew K. Ryan  
Reg. No. 30,800  
(212) 588-0800



日本国特許庁  
PATENT OFFICE  
JAPANESE GOVERNMENT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて  
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed  
with this Office.

出願年月日  
Date of Application:

2000年11月 2日

出願番号  
Application Number:

特願2000-335631

出願人  
Applicant(s):

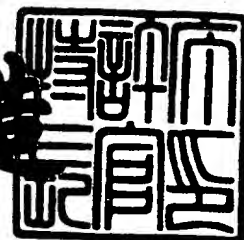
富士写真光機株式会社

CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT

2000年12月 1日

特許庁長官  
Commissioner,  
Patent Office

及川耕造



【書類名】 特許願

【整理番号】 FJ00-009

【提出日】 平成12年11月 2日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06F 17/00  
G02B 13/00

【発明者】

    【住所又は居所】 埼玉県大宮市植竹町 1 丁目 3 2 4 番地 富士写真光機株式会社内

    【氏名】 矢部 輝

【特許出願人】

    【識別番号】 000005430

    【氏名又は名称】 富士写真光機株式会社

【代理人】

    【識別番号】 100109656

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 三反崎 泰司

【代理人】

    【識別番号】 100098785

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 藤島 洋一郎

【手数料の表示】

    【予納台帳番号】 019482

    【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

    【物件名】 明細書 1

    【物件名】 図面 1

    【物件名】 要約書 1

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光学系の最適化方法および装置、ならびに光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 少なくとも一つの収差を含む第 1 の光学特性についての目標値が設定された最適化用の関数に基づいて、前記第 1 の光学特性が、前記設定された目標値に近づくように、設計対象の光学系に対して光学系の最適化を行うステップと、

前記第 1 の光学特性と比較して前記光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第 2 の光学特性についての光学系の評価結果に基づいて、前記第 2 の光学特性が、前記第 2 の光学特性についての所望の目標値に近づくように、前記最適化用の関数の自動調整を行うステップと、

この自動調整された後の最適化用の関数に基づいて、前記最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化を行うステップと

を含むことを特徴とする光学系の最適化方法。

【請求項 2】 少なくとも一つの収差を含む第 1 の光学特性を評価の対象として、設計対象の光学系に対して第 1 の評価を行うステップと、

前記第 1 の評価の結果と、前記第 1 の光学特性についての目標値が設定された最適化用の第 1 の関数とに基づいて、前記第 1 の光学特性が、前記設定された目標値に近づくように、前記光学系の最適化を行うステップと、

前記第 1 の光学特性と比較して前記光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第 2 の光学特性を評価の対象として、前記最適化が行われた後の光学系に対して第 2 の評価を行うステップと、

少なくとも前記第 2 の評価の結果に基づいて、前記第 2 の光学特性が、前記第 2 の光学特性についての所望の目標値に近づくように、前記第 1 の関数の自動調整を行うステップと、

この自動調整された後の前記第 1 の関数に基づいて、前記最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化を行うステップと

を含むことを特徴とする光学系の最適化方法。

【請求項 3】 前記第 1 の関数は、前記第 1 の光学特性が複数ある場合において、それぞれの光学特性についての重み付けの値を含む

ことを特徴とする請求項 2 記載の光学系の最適化方法。

【請求項 4】 前記第 1 の関数の自動調整を行うステップは、前記第 2 の評価の結果と、前記第 2 の光学特性についての前記所望の目標値が加味された最適化用の第 2 の関数とに基づいて、前記第 1 の関数の自動調整を行う処理を含む

ことを特徴とする請求項 2 または 3 記載の光学系の最適化方法。

【請求項 5】 前記第 2 の光学特性は、MTF を含むことを特徴とする請求項 2 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の光学系の最適化方法。

【請求項 6】 前記第 1 の光学特性は、異なる位置に設定された複数のサンプル物点についての光学特性を含み、

前記第 1 の関数には、さらに、前記複数のサンプル物点の光学特性のそれぞれについての相対的な重み付けの値が加味され、

前記第 1 の関数の自動調整は、前記複数のサンプル物点のそれぞれの光学特性についての重み付けの値の大きさを相対的に調整する処理を含む

ことを特徴とする請求項 2 ないし 5 のいずれか 1 項に記載の光学系の最適化方法。

【請求項 7】 前記複数のサンプル物点についての光学特性は、各サンプル物点についての互いに直交する 2 つの成分ごとの光学特性を含み、

前記第 1 の関数の自動調整は、各サンプル物点についての前記互いに直交する 2 つの成分ごとの重み付けの値の大きさを各成分ごとに調整する処理を含む

ことを特徴とする請求項 6 記載の光学系の最適化方法。

【請求項 8】 前記第 1 の光学特性は、一つのサンプル物点からの複数の異なるサンプル光線のそれぞれについての光学特性を含み、

前記第 1 の関数には、さらに、前記複数の異なるサンプル光線のそれぞれについての相対的な重み付けの値が加味され、

前記第 1 の関数の自動調整は、前記複数の異なるサンプル光線のそれぞれについての重み付けの値の大きさを相対的に調整する処理を含む

ことを特徴とする請求項 2 ないし 7 のいずれか 1 項に記載の光学系の最適化方

法。

【請求項 9】 前記複数の異なるサンプル光線についての光学特性は、各サンプル光線についての互いに直交する 2 つの成分ごとの光学特性を含み、

前記第 1 の関数の自動調整は、各サンプル光線についての前記互いに直交する 2 つの成分ごとの重み付けの値の大きさを各成分ごとに調整する処理を含むことを特徴とする請求項 8 記載の光学系の最適化方法。

【請求項 10】 前記第 2 の光学特性は、MTF を含み、

前記第 1 の光学特性は、MTF のピーク位置の制御に寄与するピーク位置制御用の光学特性を含み、

前記第 1 の関数の自動調整は、MTF が所望の目標値に近づくように、前記ピーク位置制御用の光学特性を表す関数を調整する処理を含む

ことを特徴とする請求項 2 ないし 9 のいずれか 1 項に記載の光学系の最適化方法。

【請求項 11】 前記ピーク位置制御用の光学特性を表す関数は、主光線についての像面湾曲を表す関数を含む

ことを特徴とする請求項 10 記載の光学系の最適化方法。

【請求項 12】 前記ピーク位置制御用の光学特性を表す関数は、たて収差の平均を表す関数を含む

ことを特徴とする請求項 10 記載の光学系の最適化方法。

【請求項 13】 前記ピーク位置制御用の光学特性を表す関数は、2 乗スポットサイズの最小点を表す関数を含む

ことを特徴とする請求項 10 記載の光学系の最適化方法。

【請求項 14】 前記光学系の最適化を行うステップにおいて、グローバル最適化を行うことにより複数の局所的な最適解を求め、

前記第 2 の評価を行うステップにおいて、前記複数の局所的な最適解によって表される複数の光学系の少なくとも一つの光学系のそれぞれに対して、前記第 2 の評価を行い、

前記第 1 の関数の自動調整を行うステップにおいて、前記少なくとも一つの光学系のそれぞれについて、前記第 2 の光学特性が所望の目標値に近づくように、

前記第 1 の関数の自動調整を行い、

前記再度最適化を行うステップにおいて、前記少なくとも一つの光学系のそれぞれに対して、再度最適化を行う

ことを特徴とする請求項 2 ないし 1 3 のいずれか 1 項に記載の光学系の最適化方法。

【請求項 1 5】 少なくとも一つの収差を含む第 1 の光学特性についての目標値が設定された最適化用の関数に基づいて、前記第 1 の光学特性が、前記設定された目標値に近づくように、設計対象の光学系に対して光学系の最適化を行う最適化手段と、

前記第 1 の光学特性と比較して前記光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第 2 の光学特性についての光学系の評価結果に基づいて、前記第 2 の光学特性が、前記第 2 の光学特性についての所望の目標値に近づくように、前記最適化用の関数の自動調整を行う調整手段と、

この自動調整された後の最適化用の関数に基づいて、前記最適化が行われた後の光学系に対して再度最適化が行われるよう、前記最適化手段の制御を行う制御手段と

を備えたことを特徴とする光学系の最適化装置。

【請求項 1 6】 少なくとも一つの収差を含む第 1 の光学特性を評価の対象として、設計対象の光学系に対して第 1 の評価を行う第 1 の評価手段と、

前記第 1 の評価の結果と、前記第 1 の光学特性についての目標値が設定された最適化用の第 1 の関数とに基づいて、前記第 1 の光学特性が、前記設定された目標値に近づくように、前記光学系の最適化を行う最適化手段と、

前記第 1 の光学特性と比較して前記光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第 2 の光学特性を評価の対象として、前記最適化が行われた後の光学系に対して第 2 の評価を行う第 2 の評価手段と、

少なくとも前記第 2 の評価の結果に基づいて、前記第 2 の光学特性が、前記第 2 の光学特性についての所望の目標値に近づくように、前記第 1 の関数の自動調整を行う調整手段と、

前記最適化手段に対して、自動調整された後の前記第 1 の関数に基づいた最適



化を行わせる制御手段と

この自動調整された後の前記第 1 の関数に基づいて、前記最適化が行われた後の光学系に対して再度最適化が行われるよう、前記最適化手段の制御を行う制御手段と

を備えたことを特徴とする光学系の最適化装置。

【請求項 1 7】 コンピュータで実行可能な光学系の最適化用プログラム、を記録した記録媒体であって、

前記最適化用プログラムは、

少なくとも一つの収差を含む第 1 の光学特性についての目標値が設定された最適化用の関数に基づいて、前記第 1 の光学特性が、前記設定された目標値に近づくように、設計対象の光学系に対して光学系の最適化を行うステップと、

前記第 1 の光学特性と比較して前記光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第 2 の光学特性についての光学系の評価結果に基づいて、前記第 2 の光学特性が、前記第 2 の光学特性についての所望の目標値に近づくように、前記最適化用の関数の自動調整を行うステップと、

この自動調整された後の最適化用の関数に基づいて、前記最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化を行うステップと

を含む

ことを特徴とする光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体。

【請求項 1 8】 コンピュータで実行可能な光学系の最適化用プログラム、を記録した記録媒体であって、

前記最適化用プログラムは、

少なくとも一つの収差を含む第 1 の光学特性を評価の対象として、設計対象の光学系に対して第 1 の評価を行うステップと、

前記第 1 の評価の結果と、前記第 1 の光学特性についての目標値が設定された最適化用の第 1 の関数とに基づいて、前記第 1 の光学特性が、前記設定された目標値に近づくように、前記光学系の最適化を行うステップと、

前記第 1 の光学特性と比較して前記光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第 2 の光学特性を評価の対象として、前記最適化が行われた後の

光学系に対して第 2 の評価を行うステップと、

少なくとも前記第 2 の評価の結果に基づいて、前記第 2 の光学特性が、前記第 2 の光学特性についての所望の目標値に近づくように、前記第 1 の関数の自動調整を行うステップと、

この自動調整された後の前記第 1 の関数に基づいて、前記最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化を行うステップと

を含む

ことを特徴とする光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光学系の自動設計を行うための光学系の最適化方法および装置、ならびに光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体に関する。

【0002】

【従来の技術】

近年、光学系の設計（以下、単に「光学設計」ともいう。）は、コンピュータを利用した自動設計によって行うことが一般的になっている。コンピュータを利用した光学系の自動設計は、コンピュータ上で設計用のプログラムを実行させることにより実現される。従って、光学系の自動設計では、優れた設計用のプログラムを使用することが、良好な光学設計を行うために重要な要素となる。

【0003】

光学設計は、設計対象となる光学系が所望の光学性能を満たすように、その設計パラメータを最適化していく作業である。以下、この光学系の最適化の基本的な概念について説明する。なお、ここでいう“光学系”とは、レンズやミラーなどの光学素子を少なくとも一つ備えたものを示すが、以下では、説明を簡単にするために光学系の構成要素が主としてレンズのみである場合を例に説明する。ただし、レンズ以外の光学素子を含む場合の設計についても、基本的に、以下で説明するレンズ設計の手法と同様である。

【0004】

レンズ設計の分野では、各レンズ面の曲率、面間隔、ガラスの屈折率、分散および非球面係数など、レンズの構成を表す種々の数値のことをパラメータと呼ぶ。レンズ設計では、近軸諸量（焦点距離、バックフォーカスなど）、収差およびレンズ形状など、レンズの光学性能を表すものの少なくとも一つを、レンズの性能評価の対象とし、その評価の対象のそれぞれに目標となる数値を与える。レンズ設計では、各評価対象の評価値が、与えられた目標値に近づくように、パラメータを変化させる作業が行われる。

## 【 0 0 0 5 】

レンズ設計の分野において、レンズの評価を行うための関数は、一般にメリット関数（または評価関数）と呼ばれる。メリット関数は、「 $w_i * (f_i - t_i)^2$ 」で表される評価対象ごとについての関数を、すべての評価対象について総和したものである。なお、このメリット関数を表す式において、 $f_i$ は、 $i$ 番目（ $i$ は1以上の整数。）の評価対象の現在の特性値（評価値）、 $t_i$ は、 $i$ 番目の評価対象に対して与えられた目標値、 $w_i$ は $i$ 番目の評価対象に掛かるウェイト（重み値）である。また、記号 $*$ は、乗算を示す。このメリット関数が最小の値をとるようなパラメータの値を求めることが、レンズの自動設計の基本的な作業である。メリット関数を最小化するためのアルゴリズムとしては、減衰最小自乗（DLS : Damped Least Squares）法や準ニュートン法など、多数のものが存在する。レンズの自動設計では、すべての評価値 $f_i$ を目標値 $t_i$ どおりにすることが理想であるが、実際には、必ずしもすべての評価値 $f_i$ を目標値 $t_i$ どおりにできるとは限らない。このような場合には、各目標値 $t_i$ にかかるウェイト $w_i$ のバランスが変わればメリット関数の最小点は変わる。パラメータを変えてメリット関数の最小点を求める作業のことを一般に“レンズの最適化”と呼ぶ。

## 【 0 0 0 6 】

ところで、一般にレンズ設計を行う場合において、焦点距離やバックフォーカスなどの近軸量、レンズ全長やレンズ径などのレンズ形状、ディストーションの許容量などの設計条件は、規格値どおりの値にする必要がある。規格値は特定の値である場合と、ある程度の許容範囲が認められている場合とがある。ここで、規格値どおりの値にする必要がある設計条件を“拘束”と呼ぶ。レンズの最適化

におけるパラメータ空間での最適点は、すべての拘束が規格値どおりの値であるという条件下でのメリット関数の最小点と定式化できる。

#### 【 0 0 0 7 】

レンズは、例えば撮像レンズであればその使用目的とする物体距離範囲および画面サイズにおいて良好な結像性能を持つ必要がある。さらにそのレンズがズームレンズであれば、ズーム範囲の全域で、その使用目的とする物体距離範囲および画面サイズにおいて良好な結像性能を持つ必要がある。このようなレンズを設計する場合、まず、ズーム範囲の中でいくつかの代表的なズーム位置を選び、そのズーム位置における光学性能を最適化の対象とする。そして個々のズーム位置においていくつかの代表的な物体距離を選び、さらにその物体面上にいくつかの代表点を選ぶ。このように、ズームレンズの場合にはいくつかのズーム位置と物体距離にわたってサンプリングされた、複数のサンプル物点からのそれぞれの光線の像面での結像状態を、総合的に最適化する。以上の説明ではズーム機能を持った撮像レンズを例に挙げたが、この例に限らず、レンズの使用目的に合わせて選ばれた、一つまたは複数のサンプル物点の像面での結像状態を最適化することが、レンズ設計の一般的な形態である。

#### 【 0 0 0 8 】

次に、レンズの性能評価に用いられる代表的な光学特性について説明する。光学系において物点からの光は、ある広がりを持った光束としてレンズなどを通過し像面に達する。このとき、像面に達した光束は、像面上にその光学系の特性に応じた強度分布を形成する。これを点像分布関数（ $PSF$  ; Point Spread Function）と呼ぶ。良好な結像状態では、この点像分布関数が非常に狭い領域だけで 0（ゼロ）でない値をとる。全平面（像面）での強度の積分を 1 に規格化したときの、点像分布関数のフーリエ変換を光学的伝達関数（ $OTF$  ; Optical Transfer Function）と呼ぶ。 $OTF$  は、2次元の周波数空間上の複素数値関数である。また $OTF$ の絶対値を $MTF$ （Modulation Transfer Function）と呼ぶ。 $MTF$ は、0と1の間の数値をとり、周波数空間の原点で $MTF$ は常に1となる。 $MTF$ の値が大きいほど光学系の結像状態は良好であるといえる。レンズの性能目標は、 $MTF$ の値によって与えられる場合が多い。 $MTF$ は通常、S方向（サジ

タル方向)とT方向(タンジェンシャル方向)について評価される。ここで、S方向とは、子午面に垂直な方向のことをいう。またT方向は、子午面に含まれる方向をいう。“子午面”とは、軸対称性のあるレンズで物点が対称軸の上でない場合に、対称軸と物点を含む平面のことをいう。

## 【0009】

物点から像面に達する光束の中からいくつかのサンプル光線を選び、これらの光線の像面での位置をプロットしたものを“スポットダイアグラム”と呼ぶ。これらの光線が一点に集まっているほど光学系の結像状態は良好であるといえる。像面上において互いに直交する二つの軸を、X軸、Y軸として設定する。そして、i番目のサンプル光線の像面上における座標を $X_i$ 、 $Y_i$ とし、 $X_i$ と $Y_i$ のサンプル光線全体での平均の座標を $X_m$ 、 $Y_m$ とする。そして「 $(X_i - X_m)^2 + (Y_i - Y_m)^2$ 」の平均の平方根を“RMS (Root Mean Square) スポットサイズ”と呼ぶ。RMS スポットサイズは、光線が集まっている状況を表す一つの数値であり、その数値が小さいことは点像分布関数の広がり小さいことに対応する。通常、光源が単色光でない場合には、いくつかのサンプル波長を選び、各サンプル波長での光線追跡を行う。

## 【0010】

光学系の絞りの中心を通る基準波長の光線を“主光線”と呼ぶ。主光線の像面上での座標を $X_c$ 、 $Y_c$ とし、i番目のサンプル光線の像面上における座標を $X_i$ 、 $Y_i$ としたとき、「 $X_i - X_c$ 、 $Y_i - Y_c$ 」をサンプル光線の主光線を基準とした“横収差”と呼ぶ。この横収差は、レンズの自動設計における代表的な性能評価の対象である。すべてのサンプル物点でのすべてのサンプル光線についての横収差を性能評価の対象にすることは、典型的なメリット関数の構成例である。横収差をメリット関数に含める場合の最も単純な目標値とウェイトの設定は、すべてのサンプル物点でのすべてのサンプル光線についてX成分、Y成分とも目標値=0、ウェイト=1とすることである。主光線の座標 $X_c$ 、 $Y_c$ とサンプル光線全体での平均の座標 $X_m$ 、 $Y_m$ とは通常大きな差がないことを考えると、上記のような横収差に関するメリット関数の構成は、RMSスポットサイズの2乗をすべてのサンプル物点について加えたものを、メリット関数にすることに相当する。ただし、レンズの

自動設計をする上で、必ずしもすべてのサンプル光線について横収差の目標値を同一の値に設定する必要はない。またウェイトも、必ずしもすべてのサンプル光線について同一の値に設定する必要はない。レンズの自動設計では、個々のサンプル光線についての目標値とウェイトに任意の値を設定することができる。各サンプル光線についての目標値とウェイトの値の設定が変われば自動設計の最適解が変わる。

#### 【0 0 1 1】

レンズの収差には、以上で説明したもののほかにも、近軸像点を基準とした横収差、波面収差、球面収差および主光線の像面湾曲などがある。レンズの自動設計においては、これらの収差を性能評価の対象としてメリット関数に含めることも結像状態を最適化するために有効である。

#### 【0 0 1 2】

##### 【発明が解決しようとする課題】

ところで、一般的な収差のみをメリット関数に含めてレンズの自動設計を行った場合、その最適解は、収差の評価については最適なものとなるが、それ以外の光学特性の評価、例えばMTFについての評価は必ずしも最適なものになるとは限らない。そこで、レンズの性能目標がMTFの値によって与えられている場合には、MTFをメリット関数に含めてレンズの最適化を行うことが考えられる。しかしながら、それには以下のような問題点がある。

#### 【0 0 1 3】

まず、MTFは収差に比べて設計パラメータに対する非線形性が強く、収差を評価対象とした場合に比べて効果的な最適化が難しいという問題がある。MTFの非線形性が強いことは、MTFが0と1の間の値しかとらないことから分かる。一方で、MTFは値が大きいほど好ましいので、通常、性能目標となっているMTFの値をすべて加えたもの（例えば各画角ごとのMTFの値をすべて加えたもの）を最大化することが自然な設計目標となる。この場合、最大化の対象となるメリット関数は、MTFに関する1次式である。ところが、DLS法などの従来の最適化アルゴリズムは、非線形性のあまり強くない収差などを評価対象として用いることを想定しており、その評価値と目標値との差の2乗和を最小化す

ることを目的としている。そのため、従来の最適化アルゴリズムは、MTFのような非線形性の強いものを評価対象とした最適化には不向きである。以上の理由により、従来の最適化手法では、MTFを評価対象とした能率的な最適化は難しいことが分かる。

## 【 0 0 1 4 】

また、MTFを求めるための計算は収差の計算に比べて時間がかかるという問題がある。収差を評価対象とした最適化を行う場合、一つのサンプル物点でのサンプル光線の本数は10から20本程度で十分であるが、MTFを実用的な精度で計算するためには一つのサンプル物点で少なくとも100本以上の光線を追跡する必要がある。また、光線追跡の結果からMTFを求める手順は収差を求める手順と比べて複雑ではるかに時間がかかる。以上の理由により、MTFを評価対象としたレンズの最適化は時間がかかることが分かる。

## 【 0 0 1 5 】

以上のようにMTFをメリット関数に含めてレンズの最適化を行うことには種々の問題があるので、実際のレンズ設計では、以下のような作業を繰り返すことが一般的である。すなわち、まず収差を評価対象としてレンズの最適解を求めた後、次にその最適解についてMTFを評価し、MTFに関してより良い値が得られるように、設計者が収差に関するウェイトや目標値を調整して再度最適化をやり直す、という作業を繰り返す。しかしながら、このようなレンズ設計方法では、設計者の手作業が必要になるので、自動設計の利点である計算機の高速度性を最大限利用することができないという問題がある。また、良いMTFの値が得られるように収差のウェイトや目標値を調整するには、設計者の経験や勘が必要とされるという問題もある。そこで、設計者によるウェイトや目標値の調整といった作業と同等の機能を、自動化することができれば、MTFの最適化を目標とした非常に高速で能率的なレンズ設計が実現できると考えられる。

## 【 0 0 1 6 】

本発明はかかる問題点に鑑みてなされたもので、その目的は、従来に比べて高速で能率的に、MTFなどの非線形性の強い光学特性についての最適化を図ることができる光学系の最適化方法および装置、ならびに光学系の最適化用プログラ

ムを記録した記録媒体を提供することにある。

【0017】

【課題を解決するための手段】

本発明の第1の観点による光学系の最適化方法は、少なくとも一つの収差を含む第1の光学特性についての目標値が設定された最適化用の関数に基づいて、第1の光学特性が、設定された目標値に近づくように、設計対象の光学系に対して光学系の最適化を行うステップを含むものである。本発明の第1の観点による光学系の最適化方法は、第1の光学特性と比較して光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第2の光学特性についての光学系の評価結果に基づいて、第2の光学特性が、第2の光学特性についての所望の目標値に近づくように、最適化用の関数の自動調整を行うステップと、この自動調整された後の最適化用の関数に基づいて、最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化を行うステップとを、さらに含むものである。

【0018】

本発明の第1の観点による光学系の最適化装置は、少なくとも一つの収差を含む第1の光学特性についての目標値が設定された最適化用の関数に基づいて、第1の光学特性が、設定された目標値に近づくように、設計対象の光学系に対して光学系の最適化を行う最適化手段を備えている。本発明の第1の観点による光学系の最適化装置は、第1の光学特性と比較して光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第2の光学特性についての光学系の評価結果に基づいて、第2の光学特性が、第2の光学特性についての所望の目標値に近づくように、最適化用の関数の自動調整を行う調整手段と、この自動調整された後の最適化用の関数に基づいて、最適化が行われた後の光学系に対して再度最適化が行われるよう、最適化手段の制御を行う制御手段とを、さらに備えている。

【0019】

本発明の第1の観点による光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体は、上述の第1の観点による光学系の最適化方法における各ステップの処理をコンピュータに対して行わせるための最適化用プログラムを記録したものである。

【0020】



本発明の第1の観点による光学系の最適化方法および装置、ならびに光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体では、少なくとも一つの収差を含む第1の光学特性についての目標値が設定された最適化用の関数に基づいて、第1の光学特性が、設定された目標値に近づくように、設計対象の光学系の最適化が行われる。次に、第1の光学特性と比較して光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第2の光学特性についての光学系の評価結果に基づいて、第2の光学特性が、第2の光学特性についての所望の目標値に近づくように、最適化用の関数の自動調整が行われる。そして、この自動調整された後の最適化用の関数に基づいて、最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化が行われる。このような自動調整と最適化のサイクルが少なくとも一回行われる。

## 【0021】

本発明の第2の観点による光学系の最適化方法は、少なくとも一つの収差を含む第1の光学特性を評価の対象として、設計対象の光学系に対して第1の評価を行うステップと、第1の評価の結果と、第1の光学特性についての目標値が設定された最適化用の第1の関数とに基づいて、第1の光学特性が、設定された目標値に近づくように、光学系の最適化を行うステップとを含むものである。本発明の第2の観点による光学系の最適化方法は、第1の光学特性と比較して光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第2の光学特性を評価の対象として、最適化が行われた後の光学系に対して第2の評価を行うステップと、少なくとも第2の評価の結果に基づいて、第2の光学特性が、第2の光学特性についての所望の目標値に近づくように、第1の関数の自動調整を行うステップと、この自動調整された後の第1の関数に基づいて、最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化を行うステップとを、さらに含むものである。

## 【0022】

本発明の第2の観点による光学系の最適化装置は、少なくとも一つの収差を含む第1の光学特性を評価の対象として、設計対象の光学系に対して第1の評価を行う第1の評価手段と、第1の評価の結果と、第1の光学特性についての目標値が設定された最適化用の第1の関数とに基づいて、第1の光学特性が、設定された目標値に近づくように、光学系の最適化を行う最適化手段とを備えたものである。

る。本発明の第2の観点による光学系の最適化装置は、第1の光学特性と比較して光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第2の光学特性を評価の対象として、最適化が行われた後の光学系に対して第2の評価を行う第2の評価手段と、少なくとも第2の評価の結果に基づいて、第2の光学特性が、第2の光学特性についての所望の目標値に近づくように、第1の関数の自動調整を行う調整手段と、この自動調整された後の前記第1の関数に基づいて、最適化が行われた後の光学系に対して再度最適化が行われるよう、最適化手段の制御を行う制御手段とを、さらに備えたものである。

## 【0023】

本発明の第2の観点による光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体は、上述の第2の観点による光学系の最適化方法における各ステップの処理をコンピュータに対して行わせるための最適化用プログラムを記録したものである。

## 【0024】

ここで、本発明の第2の観点による光学系の最適化方法において、第1の関数は、第1の光学特性についての重み付けの値を含むものである。

## 【0025】

本発明の第2の観点による光学系の最適化方法における第1の関数の自動調整を行うステップは、第2の評価の結果と、第2の光学特性についての所望の目標値が加味された最適化用の第2の関数とに基づいて、第1の関数の自動調整を行う処理を含むものである。

## 【0026】

また、本発明の第2の観点による光学系の最適化方法において、第2の光学特性は、例えばMTFを含むものである。

## 【0027】

また、本発明の第2の観点による光学系の最適化方法において、第1の光学特性は、例えば、異なる位置に設定された複数のサンプル物点についての光学特性を含み、第1の関数の自動調整は、複数のサンプル物点のそれぞれの光学特性についての重み付けの値の大きさを相対的に調整する処理を含むものである。このとき、第1の関数の自動調整として、さらに、各サンプル物点についての互いに

直交する 2 つの成分ごとの重み付けの値の大きさを各成分ごとに調整する処理を含めるようにしても良い。なお、ここでいう互いに直交する 2 つの成分とは、例えば、像面上に設定された互いに直交する X 軸、Y 軸成分のことである。

## 【 0 0 2 8 】

また、本発明の第 2 の観点による光学系の最適化方法において、第 1 の光学特性は、例えば、一つのサンプル物点からの複数の異なるサンプル光線のそれぞれについての光学特性を含み、第 1 の関数の自動調整は、複数の異なるサンプル光線のそれぞれについての重み付けの値の大きさを相対的に調整する処理を含むものである。このとき、第 1 の関数の自動調整として、さらに、各サンプル光線についての互いに直交する 2 つの成分ごとの重み付けの値の大きさを各成分ごとに調整する処理を含めるようにしても良い。なお、ここでいう互いに直交する 2 つの成分とは、例えば、像面上に設定された互いに直交する X 軸、Y 軸成分のことである。

## 【 0 0 2 9 】

また、本発明の第 2 の観点による光学系の最適化方法において、第 1 の光学特性は、例えば、MTF のピーク位置の制御に寄与するピーク位置制御用の光学特性を含み、第 1 の関数の自動調整は、MTF が所望の目標値に近づくように、ピーク位置制御用の光学特性を表す関数を調整する処理を含むものである。ここで、ピーク位置制御用の光学特性を表す関数は、例えば、主光線についての像面湾曲を表す関数、たて収差の平均を表す関数および 2 乗スポットサイズの最小点を表す関数などを含むものである。

## 【 0 0 3 0 】

本発明の第 2 の観点による光学系の最適化方法は、いわゆるグローバル最適化に適用可能となっている。グローバル最適化に適用する場合には、例えば、光学系の最適化を行うステップにおいて、グローバル最適化を行うことにより複数の局所的な最適解を求める。また、第 2 の評価を行うステップにおいて、複数の局所的な最適解によって表される複数の光学系の少なくとも一つの光学系のそれぞれに対して、第 2 の評価を行う。そして、第 1 の関数の自動調整を行うステップにおいて、少なくとも一つの光学系のそれぞれについて、第 2 の光学特性が所望

の目標値に近づくように、第 1 の関数の自動調整を行い、少なくとも一つの光学系のそれぞれに対して、再度最適化を行う。このように、グローバル最適化後に、自動調整と最適化のサイクルを少なくとも一回行う。

#### 【0031】

本発明の第 2 の観点による光学系の最適化方法および装置、ならびに光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体では、設計対象の光学系に対して、少なくとも一つの収差を含む第 1 の光学特性を評価の対象として、第 1 の評価が行われ、この第 1 の評価の結果と、第 1 の光学特性についての目標値が設定された最適化用の第 1 の関数とに基づいて、第 1 の光学特性が、設定された目標値に近づくように、光学系の最適化が行われる。次に、この最適化が行われた後の光学系に対して、第 1 の光学特性と比較して光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第 2 の光学特性を評価の対象として、第 2 の評価が行われる。次に、少なくともこの第 2 の評価の結果に基づいて、第 2 の光学特性が、第 2 の光学特性についての所望の目標値に近づくように、第 1 の関数の自動調整が行われる。そして、この自動調整された後の第 1 の関数に基づいて、最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化が行われる。このような自動調整と最適化のサイクルが少なくとも一回行われる。

#### 【0032】

なお、本発明において、“光学系”とは、レンズやミラーなどの光学素子を少なくとも一つ備え、その光学素子による光の屈折や反射現象などを利用して所望の光学像を得るためのものをいう。

#### 【0033】

##### 【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

#### 【0034】

##### 〔第 1 の実施の形態〕

図 1 は、本発明の第 1 の実施の形態に係る光学系の最適化装置のハードウェア構成を示している。本実施の形態に係る光学系の最適化装置は、コンピュータによって構成されている。すなわち、本最適化装置は、図 1 に示したように、CP

U（中央処理装置）11と、主記憶装置（内部記憶装置）12と、入力装置13と、出力装置14と、補助記憶装置（外部記憶装置）15とを備えている。本最適化装置は、さらに、これらの構成要素を相互接続するためのバス16を備えている。

#### 【0035】

CPU11は、供給されたプログラムに基づいて、各部の制御を行ったり所定の演算を行うようになっている。主記憶装置12は、例えばRAM（ランダム・アクセス・メモリ）によって構成されている。主記憶装置12は、主としてCPU11の作業領域として使用されるものであり、例えば補助記憶装置15からロードされたプログラムおよびデータや、CPU11による演算後のデータなどを記憶するようになっている。

#### 【0036】

入力装置13は、各種の設定データなどを入力するために使用されるものであり、キーボードやマウスなどを含んで構成されている。出力装置14は、例えばCPU11の演算結果などを外部に出力するためのものであり、ディスプレイやプリンタなどを含んで構成されている。出力装置14を構成するディスプレイとしては、例えば陰極線管（CRT；Cathode Ray Tube）や液晶ディスプレイ（LCD；Liquid Crystal Display）などがある。

#### 【0037】

補助記憶装置15は、主記憶装置12の補助的な役割を持つものであり、CPU11によって実行されるプログラムや、プログラムの実行時に必要とされるデータ、CPU11による演算後のデータなどを記憶するものである。この補助記憶装置15は、インタフェース（図では、I/Fと記す。）22を介してバス16に接続されたハードディスクドライブ（HDD）23と、インタフェース21を介してバス16に接続されたドライブ装置24と、ドライブ装置24に対して着脱可能な記録媒体25とを有している。ハードディスクドライブ23は、内部にデータの読み書きが可能なハードディスクを有している。ハードディスクドライブ23と記録媒体25は、本発明における最適化用プログラムを記録した記録媒体の一具体例に対応する。

## 【 0 0 3 8 】

記録媒体 2 5 としては、フラッシュメモリなどを利用した各種のメモリカードや、光ディスク、フロッピーディスクなどが適用される。記録媒体 2 5 として適用される光ディスクとしては、例えば、CD-ROM (Compact Disc-Read Only memoly)、CD-R (Recordable) などの各種のCDメディアや光磁気ディスク (MO (magneto-optical) ディスク) などがある。ドライブ装置 2 4 は、記録媒体 2 5 の種類に対応した装置であり、記録媒体 2 5 に書き込まれたデータを読み取る機能を有している。ドライブ装置 2 4 は、また、記録媒体 2 5 がデータの書き込みが可能なものである場合には、記録媒体 2 5 にデータの書き込みを行う機能をも有している。

## 【 0 0 3 9 】

本最適化装置では、ハードディスクドライブ 2 3 や記録媒体 2 5 に記憶された光学系の最適化用プログラムが、主記憶装置 1 2 にロードされると共に、そのロードされた最適化用プログラムがCPU 1 1 において実行されることにより、光学系の最適化が行われる。光学系の最適化に必要とされる初期設定データなどは、入力装置 1 3 から入力される。初期設定データの入力に際しては、出力装置 1 4 のディスプレイに、データの入力を促す画面が表示される。最適化後のデータは、出力装置 1 4 のディスプレイやプリンタに出力される。

## 【 0 0 4 0 】

なお、本最適化装置において実行される光学系の最適化用プログラムは、ハードディスクドライブ 2 3 や記録媒体 2 5 からではなく、例えばバス 1 6 に通信インタフェースを接続することにより、LAN (Local Area Network) などの通信ネットワークを介して供給するようにしても良い。

## 【 0 0 4 1 】

図 2 は、本最適化装置の機能的な構成を示している。この図に示したように、本最適化装置は、最適化を行うために必要とされる各種のデータ 3 1 A の初期設定を行う初期設定部 3 1 と、初期設定部 3 1 から供給された設定内容を示すデータ 3 1 A に基づいて最適化のための各種の演算を行う第 1 の最適化部 3 2 および第 2 の最適化部 3 3 と、最適化の結果を出力する出力部 3 8 とを備えている。

## 【 0 0 4 2 】

初期設定部 3 1 は、例えば、光学系の構成を表す初期データの設定、最適化に用いられるパラメータの設定、メリット関数についての初期設定などを行うようになっている。メリット関数の初期設定の内容は、例えば、いずれの光学特性を最適化のための評価の対象にするかの指示や、指示した評価対象に対するウェイトおよび目標値の初期設定などが含まれる。なお、本実施の形態においては、最終的に M T F の評価を所望の値にすることを目的とし、収差を評価対象として光学系の最適解を求めると共に、最適解を求めるために使用したメリット関数を、M T F の評価が所望の値に近づくように自動調整して光学系の最適化を行う例について説明する。ここでいうメリット関数の調整とは、すなわち、メリット関数に含まれる、収差に関するウェイトや目標値を調整することである。以下では、この収差に関するウェイトや目標値を、M T F の評価が所望の値に近づくように自動調整して光学系の最適化を図る手法を単に“M T F 最適化”ともいう。

## 【 0 0 4 3 】

第 1 の最適化部 3 2 は、収差を評価対象として光学系の最適解を求める機能を有している。この第 1 の最適化部 3 2 は、収差評価部 3 4 と、収差最適化部 3 5 とを有している。収差評価部 3 4 は、収差最適化部 3 5 からの指示コマンド 3 5 B に応じて、評価の対象として設定された収差についての収差評価値を求め、設計対象の光学系の評価（第 1 の評価）を行い、その評価の結果を示すデータ 3 4 A を収差最適化部 3 5 に出力する機能を有している。収差最適化部 3 5 は、収差評価部 3 4 による評価の結果と収差を評価対象としたメリット関数（第 1 の関数）とに基づいて、収差を評価対象とした光学系の最適解を求める機能を有している。収差最適化部 3 5 は、最適解を求めるために収差の評価値が必要とされる場合には、収差評価部 3 4 に対して光学系の評価を行わせるための指示コマンド 3 5 B を送信するようになっている。

## 【 0 0 4 4 】

第 2 の最適化部 3 3 は、収差に関するウェイトや目標値を M T F の評価が所望の値に近づくように自動調整して、第 1 の最適化部 3 2 にフィードバックする機能を有している。この第 2 の最適化部 3 3 の機能が、本最適化装置の最も特徴的

な部分となっている。第2の最適化部33は、MTF評価部36と、目標値調整部37とを有している。MTF評価部36は、収差最適化部35によって求められた最適解に関するデータ35Aに基づいて、収差最適化部35によって最適化された後の光学系に対してMTFの評価（第2の評価）を行い、その評価の結果を示すデータ36Aを目標値調整部37に出力する機能を有している。目標値調整部37は、MTF評価部36による評価の結果と、初期設定部31において設定されたMTFを評価対象としたメリット関数（第2の関数）とに基づいて、収差に関するメリット関数におけるウェイトや目標値を、MTFの評価が所望の値に近づくように自動調整する機能を有している。目標値調整部37は、また、自動調整後のウェイトや目標値のデータ37Aを収差最適化部35に送信すると共に、収差最適化部35に対して、自動調整後のデータ37Aを反映させたメリット関数に基づいて、収差を評価対象とした光学系の最適解を再度行わせる機能を有している。

## 【0045】

なお、図2に示した機能構成は、図1に示したハードウェア構成による本最適化装置において、本実施の形態における光学系の最適化用プログラムを実行させることによって実現されるものである。図1に示したハードウェア構成と図2に示した機能構成との対応関係について簡単に説明すると、まず、初期設定部31の機能は、主として入力装置13によって実現される。出力部38の機能は、主として出力装置14によって実現される。第1の最適化部32および第2の最適化部33の機能は、光学系の最適化用プログラムをCPU11が実行することによって実現される。また、図2に示した機能構成と、本発明の光学系の最適化装置の各手段との対応関係について説明すると、収差評価部34が、第1の評価手段に対応し、収差最適化部35が、最適化手段に対応し、MTF評価部36が、第2の評価手段に対応し、目標値調整部37が、調整手段および制御手段に対応する。

## 【0046】

次に、以上のような構成の本最適化装置の動作および本最適化装置によって実現される光学系の最適化方法について説明する。



## 【 0 0 4 7 】

一般に、最適化のための演算の1サイクルは、変化表の計算と最適点の探索の二つに大きく分けられる。変化表とは、個々のパラメータの微小変化に対する個々の評価対象（収差など）の変化量を表にしたものである。変化表を求めるにはパラメータの個数分の光学系の評価が必要である。評価の対象となる光学特性がパラメータについて線形であれば、変化表の情報だけから最適点の位置を求めることができる。一方、評価の対象に非線形性がある場合には、変化表の情報を参考にしつつ、試行錯誤による最適点の探索が必要になる。つまり、いくつかの候補点で光学系を評価し、その中での最適点を選ぶことになる。候補点に変化表を求めた出発点から離れるほど、その候補点での状況は変化表から予測されるものとは食い違ったものになるので、そこまでの最適点で変化表を作り直し、さらに最適点の探索を行う。

## 【 0 0 4 8 】

本最適化装置では、第1の最適化部32（図2）において、収差を評価対象としたメリット関数を用いて光学系の最適解を求めると共に、第2の最適化部33において、そのメリット関数に含まれる収差に関するウェイトや目標値を、MTFの評価が所望の値に近づくように自動調整する。このとき、第2の最適化部33では、収差を評価対象とした最適化の演算の少なくとも1サイクルの間は、MTFの評価と収差に関するウェイトや目標値の調整は行わない。本最適化装置では、第2の最適化部33において、収差を評価対象とした最適化の演算の少なくとも1サイクルが終った段階でMTFを評価し、収差に関するウェイトや目標値を以下で説明する手順に従って自動調整する。そして、調整されたウェイトや目標値を使用して、第1の最適化部32において、次の最適化の1サイクルを実行する。この手順を繰り返すことによって、収差に関するウェイトと目標値がMTFの性能目標に対して適切な形に調整されていくとともに、最適化の結果がMTFの性能目標に近づいていく。収差を評価対象とした最適化のためには、従来から、高速で能率的なアルゴリズムが存在する。一方、MTFの評価は、収差の評価よりも時間がかかる。しかしながら、本最適化装置では、MTFの評価を、収差による最適化の少なくとも1サイクルごとに1回だけ行うので、最適化の1サ

イクル内で収差の評価と同じ数だけMTFの評価を行ってMTFの最適化を図る従来の方式に比べて、はるかに短い時間で処理できる。

## 【 0 0 4 9 】

本最適化装置では、ウェイトと目標値の自動調整を含む以上のMTF最適化のサイクルを、すべてのMTFの性能目標が満たされるか、それ以上の改善が望めないと判断された段階で停止させる。例えば、各サンプル物点でいくつかの空間周波数についてS（サジタル）方向、T（タンジェンシャル）方向のMTFの性能目標が設定されているとする。MTFの総合的な改善状況を判断するためには、MTFについてのメリット関数を定義する必要がある。MTFについてのメリット関数の単純な例は、MTFの目標値とMTFの現在の評価値との差を目標値に達していないすべてのMTFに関する評価対象について加えたものである。本最適化装置では、第2の最適化部33において、MTFについてのメリット関数の改善量を所定のサイクルごとに確認し、改善のない状態が指定の回数だけ続いた場合には最適化のサイクルを停止する。

## 【 0 0 5 0 】

次に、図3を参照して、以上で説明したMTF最適化処理の全体的な流れを時系列的に説明する。本実施の形態において、図3に示した各ステップを含む処理を行うための最適化用プログラムは、例えばハードディスクドライブ23または記録媒体25（図1）に、コンピュータで実行可能なプログラム形式で記録されている。

## 【 0 0 5 1 】

本最適化装置では、まず、初期設定部31（図2）によって、最適化を行うために必要とされる各種のデータ31Aの初期設定値の入力処理を行う（ステップS10）。本最適化装置は、この入力処理として、まず、設計対象となる光学系の構成を表す初期データ、すなわち、最適化の出発点となる光学系の構成データの設定を行う（ステップS11）。この光学系の構成データの具体例は、後述の実施例における出発点のレンズデータ（図5）のようなものである。本最適化装置は、入力処理として、次に、最適化に用いるパラメータの設定やメリット関数などについての初期設定を行う（ステップS12）。メリット関数の設定内容に

は、いずれの光学特性を最適化のための評価の対象にするかの指示や、指示した評価対象に対するウェイトおよび目標値の初期設定などが含まれる。メリット関数の設定は、主として収差を評価対象とした収差に関するメリット関数と、最終的な性能目標であるMTFに関するメリット関数との双方について行う。パラメータの設定やメリット関数についての初期設定の具体例は、後述の実施例に示す図6，7のようなものである。なお、以上の初期設定値の入力処理は、入力装置13を介して設計者によって直接的に入力されたデータを本最適化装置側で順次受け付けることにより行う。ただし、あらかじめ本最適化装置側で一部の初期設定用のデータを記録媒体25などに記録して用意しておき、その用意されたデータを順次読み取ることによって行うようにしても良い。

#### 【0052】

本最適化装置は、最適化を行うための各種のデータの設定が完了すると、次に、その設定内容に基づいて、第1の最適化部32によって、収差を評価対象とした光学系の最適化処理を行う（ステップS20）。この収差を評価対象とした最適化処理のサイクルは、MTFの評価を行う前に1回のみ行っても良いし複数回行っても良い。本最適化装置は、この最適化処理として、まず、収差評価部34によってパラメータの個数分の光学系の評価（第1の評価）を行った後、その評価の結果に基づいて変化表の計算を行う（ステップS21）。変化表の実質的な計算は、収差最適化部35によって行う。次に、本最適化装置は、求められた変化表に基づいて、設定されたメリット関数が最小となるようなパラメータの最適点の探索を行う（ステップS22）。この最適点の探索は、収差最適化部35によって行う。

#### 【0053】

収差を評価対象とした最適化処理のサイクルが少なくとも1回行われると、次に、本最適化装置は、第2の最適化部33によって、収差に関するメリット関数の自動調整処理を行う（ステップS30）。本最適化装置は、メリット関数の自動調整を行うために、まず、収差最適化部35によって求められた最適解に関するデータ35Aに基づいて、収差最適化部35によって最適化された後の光学系に対してMTFの評価（第2の評価）を行う（ステップS31）。次に、本最適

化装置は、MTFについての所望の性能目標が満たされたか否かを判断する（ステップS 3 2）。性能目標が満たされたとき（ステップS 3 2；Y）には、出力部3 8によって、その最適化の結果を出力する。なお、ステップS 3 2における判断には、MTFについてこれ以上の改善が望めるか否かの判断が含まれる。本最適化装置は、MTFが設定された目標値に完全に達していなくとも、MTFについてこれ以上の改善が望めない場合（ステップS 3 2；Y）には、その時点で最適化の演算を終了し、その時点での最適化の結果を出力する。

#### 【0 0 5 4】

一方、MTFについての性能目標が満たされておらず、MTFについての改善の余地があると認められるとき（ステップS 3 2；N）には、本最適化装置は、次に、収差に関するメリット関数に含まれるウェイトや目標値を、MTFの評価が所望の値に近づくように自動調整した（ステップS 3 3）後、ステップS 2 0の処理に戻る。この自動調整は、目標値調整部3 7が、MTF評価部3 6によるMTFの評価の結果と、初期設定部3 1において設定されたMTFを評価対象としたメリット関数（第2の関数）とに基づいて行う。目標値調整部3 7は、自動調整後のウェイトや目標値のデータ3 7 Aを収差最適化部3 5に送信し、収差最適化部3 5に対して、自動調整後のデータ3 7 Aを反映させたメリット関数に基づいて、収差を評価対象とした光学系の最適化を再度行わせる。本最適化装置では、以上のような処理ステップを含む最適化処理を行うことにより、MTFの性能を最終目標とした良好な最適化がなされる。

#### 【0 0 5 5】

次に、メリット関数の自動調整の内容についてより具体的に説明する。メリット関数を構成する目標値とウェイトの調整は、従来から設計者が日常的に行っているが、本最適化装置における目標値とウェイトの自動調整のアルゴリズムは、従来の設計者が行う調整方法とは異なるものである。人間はいろいろな要素を考慮して一度に複雑な判断を行うが、その思考の道筋を忠実にプログラムすることは容易ではない。自動調整用のプログラムとしては、人間の思考を再現するよりも機械的に処理できる単純な手続きを用意しておき、それを繰り返し適用することによって人間と同等の機能を実現する方法の方が現実的である。このような単

純な手続きの繰り返しは人間が実際に行うには単調すぎるが、計算機は非常に高速に処理できる。本最適化装置におけるメリット関数の自動調整は、例えば以下の3つの機能に分類できる。

【0056】

(1) 異なる複数のサンプル物点のそれぞれの光学特性についてのウェイトの相対的な大きさの調整

(2) MTFのピーク位置の制御に寄与するピーク位置制御用の関数の調整

(3) 一つのサンプル物点からの異なる複数のサンプル光線のそれぞれについてのウェイトの相対的な大きさの調整

【0057】

まず、(1)の調整について説明する。ここでは、設計対象の光学系について異なる位置に複数のサンプル物点が設定されている共に、それぞれのサンプル物点についてMTFの性能目標が与えられているものとする。この場合、それぞれのサンプル物点の収差についてどれだけのウェイトを与えれば、各サンプル物点間でのMTFのバランスが性能目標どおりになるのかあらかじめ知ることはできない。例えば二つのサンプル物点間の収差について同じウェイトを与えて最適化の演算を行ったとしても、求められた最適点におけるMTFの値が二つのサンプル物点間で同じ値になるとは限らない。また、同じサンプル物点の同じ空間周波数のS方向とT方向のMTFについても同じ値になるとは限らない。ここで、像面上に互いに直交するX軸、Y軸を設定すると共に、そのX軸、Y軸を周波数空間のS方向、T方向に一致するように設定する場合について考える。この場合、X成分の収差の改善は、主にS方向のMTFの改善に寄与し、Y成分の収差の改善は主にT方向のMTFの改善に寄与する。そこで、本最適化装置では、求められた最適点での状況を見て、例えば、S方向のMTFの性能目標に達していないサンプル物点についてはX成分の収差のウェイトを大きくし、S方向のMTFの性能目標を越えているサンプル物点についてはX成分の収差のウェイトを小さくする。ただしMTFの性能目標に達していないサンプル物点であっても、MTFの性能改善が続いている間はウェイトを大きくする必要はない。T方向のMTFとY成分の収差についても同様である。

## 【 0 0 5 8 】

次に、(2)の調整について説明する。光学系において、設定された像面の前後での光束の強度分布は、像面のシフト量に従って変化する。そして、像面での強度分布がその前後のシフト位置における強度分布より好ましいとは限らない。光学系では、像面のシフト量に従ってMTFの値も変化し、あるシフト量の位置でピーク値をとる。通常の光学系では、このピーク位置を像面にできる限り一致させることがMTFを改善するために重要となる。MTFのピーク位置は、MTFの値とは違ってパラメータに対する非線形性は小さいので通常の最適化の対象になり得る。しかしながら、MTFのピーク位置を求めることは像面でのMTFの値を求める以上に計算時間がかかる。そこで、本実施の形態では、MTFのピーク位置を直接的に最適化の対象にするのではなく、MTFのピーク位置を代表する収差関数を用意し、それを制御することによって間接的にMTFのピーク位置を制御することを考える。

## 【 0 0 5 9 】

光学系において、主光線の像面湾曲の変化量とMTFのピーク位置の変化量との間には相関関係がある。つまりS方向の像面湾曲が正側にシフトした場合、S方向のMTFのピーク位置も正側に同程度の量だけシフトする場合が多く、同様にT方向の像面湾曲が正側にシフトした場合、T方向のMTFのピーク位置も正側に同程度の量だけシフトする場合が多い。従って、主光線の像面湾曲についての関数をMTFのピーク位置制御用の関数に含めることで、ある程度はMTFのピーク位置の制御を行うことが可能である。ここで、像面湾曲を評価の対象とし、現在の評価値を $f$ とする。これを利用してMTFのピーク位置の調整を行う場合には、MTFのピーク位置が $p$ であるとき、「 $f-p$ 」を像面湾曲の新しい目標値としてメリット関数を設定する。そのメリット関数で最適化した結果、像面湾曲が $-p$ 程度変化しそれに伴ってMTFのピーク位置が $-p$ 程度変化すればMTFのピーク位置は像面付近に戻ることになる。このような制御を繰り返すことによって、MTFのピーク位置は可能な範囲で像面に一致する。

## 【 0 0 6 0 】

しかしながら、正確には主光線の像面湾曲が光束の集中位置の変化を必ずしも

代表するわけではない。MTFのピーク位置を代表する収差関数としては、以下に定義する“たて収差の平均”や“2乗スポットサイズの最小点”などが考えられる。

## 【0061】

光学系において、各サンプル光線のX成分の横収差は像面のあるシフト位置で0になる。この横収差がゼロになるシフト量を横収差と対比して“たて収差”と呼ぶ。X成分のたて収差をすべてのサンプル光線について平均したものは、S方向のMTFのピーク位置を代表する。Y方向のたて収差の平均も同様に定義できる。またi番目のサンプル光線のX座標を $X_i$ とし、 $X_i$ のサンプル光線全体での平均の座標を $X_m$ とする。そして $(X_i - X_m)^2$ のサンプル光線全体での平均をS方向の“2乗スポットサイズ”と呼ぶ。S方向の2乗スポットサイズは像面のシフト量の関数であり、その最小点はS方向のMTFのピーク位置を代表する。T方向の2乗スポットサイズの最小点も同様に定義できる。以上で説明したMTFのピーク位置を代表する収差関数の値は、すべての波長のサンプル光線を使って求めても良いし、基準波長のサンプル光線だけから求めても良い。MTFのピーク位置は空間周波数によってある程度変動する。複数の空間周波数でのMTFによって性能目標を与えている場合には、それらの空間周波数でのピーク位置の平均を求めれば良い。

## 【0062】

次に、(3)の調整について説明する。本最適化装置では、一つのサンプル物点からの異なるサンプル光線について、収差のウェイトの調整をすべてのサンプル光線で同一の比率で行うとは限らない。例えば、光学系の瞳の中心付近を通る光線群と瞳の周辺付近を通る光線群とで、ウェイトの相対的な大きさを変えるように設定しても良い。各サンプル光線についてのウェイトの相対的な大きさの調整を行うことによって、MTFの値を改善することが可能である。また、本最適化装置においては、各サンプル光線についての互いに直交する2つの成分(X成分、Y成分)ごとのウェイトの値の大きさを各成分ごとに変えるように設定しても良い。

## 【0063】

以上説明したように、本実施の形態の光学系の最適化装置および方法によれば、収差を評価対象としたメリット関数を用いて光学系の最適解を求めると共に、そのメリット関数に含まれる収差に関するウェイトや目標値を、MTFなどの評価が所望の値に近づくように自動調整し、この自動調整された後のウェイトや目標値を用いて、再度、光学系の最適化を行うようにしたので、設計者によって行われていたウェイトや目標値の調整といった従来の作業と同等の機能を自動化することができる。これにより、従来に比べて高速で能率的に、MTFなどの非線形性の強い光学特性についての最適化を図ることができる。

【0064】

〔実施例1〕

次に、本実施の形態に係る光学系の最適化装置および方法を用いたレンズの最適化の具体的な数値実施例について説明する。

【0065】

本実施例では、図4および図5に示したテッサー型の写真レンズを最適化する例について説明する。図4は、最適化前の出発点の写真レンズ1の形状を表すものであり、図5は、図4に示した写真レンズ1の構成を具体的な数値で表したレンズデータである。図4において、符号 $Z_0$ を付した線は光軸を示し、符号 $Z_1$ を付した線は最大面角での主光線を示す。また、符号2を付した線は結像面の位置を示す。図5において、面番号 $S_i$ は、最も物体側のレンズ面を第1番目として、像面側に向かうに従い順次増加する $i$ 番目のレンズ面の番号を示している。図4および図5において、符号 $R_i$ は、 $i$ 番目のレンズ面 $S_i$ の曲率半径を示す。符号 $D_i$ は、 $i$ 番目のレンズ面 $S_i$ と $i+1$ 番目のレンズ面 $S_{i+1}$ との光軸上の面間隔を示す。図5に示したレンズデータにおいて、屈折率 $N_{di}$ およびアッベ数 $v_{di}$ は、それぞれ $d$ 線（波長 $\lambda_d = 587.6 \text{ nm}$ ）に対する値を示している。曲率半径 $R_i$ および面間隔 $D_i$ の値の単位はミリメートル（mm）である。

【0066】

この写真レンズ1は、物体側から順に、第1のレンズ $L_1$ と、第2のレンズ $L_2$ と、第3のレンズ $L_3$ と、第4のレンズ $L_4$ とを備えている。第3のレンズ $L_3$



3と第4のレンズL4は、第3のレンズL3の像側のレンズ面と第4のレンズL4の物体側のレンズ面とが、互いに接合された接合レンズの構成となっている。

#### 【0067】

この写真レンズ1の設計条件として、図6に示したように、全系の焦点距離 $f$ を50mm、Fナンバー(Fno.)を4.0、物点位置を無限大、半画角 $\omega$ を20度、ディストーション(歪曲収差)を1%以内、口径蝕を無し、に設定した。また、光学性能の評価を行うためのサンプル物点は、中心位置(光軸上、半画角 $\omega$ で0度)、半画角 $\omega$ で14度、20度の3つの位置に設定した。MTFの評価周波数は40cs/mmに設定した。サンプル波長は、435.8nm, 546.1nm, 656.3nmの3つの波長に設定し、各波長のウェイトは、1:1:1に設定した。

#### 【0068】

本実施例では、図6に示した設計条件の下で、図5に示したレンズデータにおける曲率半径 $R_i$ 、面間隔 $D_i$ 、屈折率 $N_{di}$ およびアッベ数 $v_{di}$ の各数値をパラメータとし、以下に説明する目標値をメリット関数に含めてMTF最適化を行った。

#### 【0069】

まず、収差についてのメリット関数であるが、各サンプル画角での横収差と基準波長(546.1nm)でのたて収差の平均とについてを評価対象に含め、これらの収差について目標値の初期値をゼロ、ウェイトの初期値を1に設定した。また、焦点距離とディストーションが図6に示した設計値と一致するように拘束条件として設定した。

#### 【0070】

次に、MTFについてのメリット関数であるが、本実施例では、特にMTFに関する最適化の効果を示すため、画角ごとのMTFの目標値を図7に示したように2通り設定し(すなわち2通りのメリット関数を用意し)、それぞれについて最適化を行った。図7に示したように、第1の目標値の設定(以下、目標1と記す。)は、中心でのMTF性能を重視しており、S方向について中心での値を65%とし、14度、20度での値を55%とした。T方向については、14度、20度での値を65%とした。第2の目標値の設定(以下、目標2と記す。)は、S方向

についてすべての画角で同一の値 (57%) とし、T 方向についても、すべての画角で同一の値 (65%) とした。なお、例えば 65% の MTF とは、値 0.65 の MTF を意味する。

## 【 0 0 7 1 】

図 8 および図 9 は、以上のような条件での最適化を行うことによって得られたレンズの最適解を示している。図 8 は目標 1 での最適化の結果を示し、図 9 は目標 2 での最適化の結果を示している。図 8 および図 9 では、最適解の値として、MTF と、収差に関するウェイトの調整比と、たて収差の平均の調整された目標値とを、それぞれ各画角について S 方向と T 方向での値を示している。たて収差の平均の目標値の単位は  $\mu\text{m}$  である。

## 【 0 0 7 2 】

ここで、図 8 および図 9 におけるウェイトの調整比の結果は、MTF の目標設定の違いを反映している。例えば画角中心での MTF 性能を重視した目標 1 では、ウェイトの調整比の値が目標 2 に比べて大きくなっている。また、たて収差の平均の目標値の値は、MTF のピーク位置とのずれを反映している。例えば、たて収差の平均の目標値が負の値をとるということは、基準波長でのたて収差の平均が MTF のピーク位置より負側にずれることを意味している。なお、焦点距離とディストーションは拘束として制御されているので、収差のウェイトと目標値の調整の影響を受けずに設計条件どおりの値になっている。また、本実施例での MTF についてのメリット関数の値は、目標 1 の解では 4%、目標 2 の解では 2% になった。なお、ここでいう MTF についてのメリット関数値とは、MTF の目標値と最適解での MTF の評価値との差を S 方向と T 方向でのすべてのサンプル画角について加えたものである。

## 【 0 0 7 3 】

図 10 は、目標 1 での最適化によって得られた写真レンズ 1 A のレンズデータを示し、図 11 は、目標 2 での最適化によって得られた写真レンズ 1 B のレンズデータを示している。また、図 12 は、図 10 のレンズデータに対応する写真レンズ 1 A のレンズ形状を示し、図 13 は、図 11 のレンズデータに対応する写真レンズ 1 B のレンズ形状を示している。

## 【 0 0 7 4 】

図 1 4 は、目標 1 での最適化によって得られた写真レンズ 1 A の M T F 性能を示し、図 1 5 は、目標 2 での最適化によって得られた写真レンズ 1 B の M T F 性能を示している。図 1 4 および図 1 5 において、横軸は像面からのシフト量を示し、たて軸は M T F の値 (%) を示している。図 1 4 および図 1 5 では、すべての画角の M T F を重ねて図示しており、実線が S 方向、破線が T 方向の M T F を示す。より詳しくは、符号 S 1 を付した実線が中心画角での S 方向の M T F を示し、符号 S 2 を付した実線が 1 4 度の画角での S 方向の M T F を示し、符号 S 3 を付した実線が 2 0 度の画角での S 方向の M T F を示している。また、符号 T 2 を付した破線が 1 4 度の画角での T 方向の M T F を示し、符号 T 3 を付した破線が 2 0 度の画角での T 方向の M T F を示している。

## 【 0 0 7 5 】

本実施例では、目標 1 に対しては 42 サイクル、目標 2 に対しては 33 サイクルの最適化の演算を行った。なお、ここでいうサイクルとは、最適化のための演算を全体として 1 通り行うことを基本単位としている。例えば 1 サイクルとは、収差を評価対象とした最適化の演算を 1 サイクル行い、続いて M T F を評価対象としたウェイトおよび目標値の調整のための最適化の演算を 1 サイクル行ったことを示す。

## 【 0 0 7 6 】

一方、本実施例の比較例として、収差に関するウェイトおよび目標値の自動調整を行わずに収差を評価対象とした最適化の演算を行った。出発点のレンズデータや設計条件などは本実施例と同じに設定した。この場合には、14 サイクルで極小点に到達した。つまり、本実施例による M T F 最適化の演算に要する計算時間は、通常最適化を行った場合と同程度にすぎない。また、他の比較例として、収差に関するウェイトおよび目標値の自動調整を行わずに、直接に M T F を評価対象とした第 1 のメリット関数が最小となるようにパラメータを変化させる従来の手法による最適化の演算を行った。この場合には、最適解は、M T F の非線形性の影響により出発点付近のローカルミニマムに捕えられた。すなわち、この比較例での収差や M T F の評価値は、出発点での評価値に対して大きな改善は見ら

れなかった。

【0077】

以上説明したように、本実施例によれば、従来に比べて良好にMTFについての最適化を図ることができた。

【0078】

〔第2の実施の形態〕

次に、本発明の第2の実施の形態について説明する。なお、以下の説明では、上記第1の実施の形態における構成要素と同一の部分には同一の符号を付し、適宜説明を省略する。

【0079】

本実施の形態は、上述の第1の実施の形態におけるMTF最適化を、いわゆるグローバル最適化に適用したものである。本実施の形態に係る光学系の最適化のための機能は、第1の実施の形態と同様に、図1に示したハードウェア構成の装置において、本実施の形態における光学系の最適化用プログラムを実行させることにより実現される。

【0080】

上述の第1の実施の形態では、収差に関するウェイトや目標値を自動調整するMTF最適化の手法が、従来の最適化手法に比べて非常に高速で能率的であることを示した。このMTF最適化は、グローバル最適化と組み合わせて使うとき、特に有効になる。通常の最適化手法は、与えられたメリット関数について一つの最適解を求めるものであるが、グローバル最適化は、与えられたメリット関数についてパラメータ空間での複数の局所的な解（ローカルミニマム（局所的最小値））を自動的に発見していく最適化手法である。

【0081】

グローバル最適化は、一般に、収差についてのメリット関数を最適化の対象としている。従って、光学系の設計目標がMTFで与えられている場合には、グローバル最適化によって求められた多数のローカルミニマムの中から、設計者がMTFの性能目標に最も適合する解を選ぶ作業を行う必要がある。しかしながら、収差を評価対象としたメリット関数についての最善の解が、MTFの性能目標に

最も適合するという保証はない。このことについて図 1 6 を参照して説明する。

#### 【 0 0 8 2 】

図 1 6 において、たて軸はメリット関数の値を表し、横軸はパラメータの値を示す。なお、パラメータの値は、ある特定のパラメータについての値を示すものではなく、複数のパラメータを有するパラメータ空間内での複合的なパラメータの値を概念的に示したものである。図中、符号 5 0 を付した実線は、収差を目標値としたメリット関数についてを示し、符号 5 1 を付した破線は、MTF を目標値としたメリット関数についてを示す。図中、例えば、符号 5 2 A, 5 2 B を付した点は、収差についてのローカルミニマムの位置を示す。また、図中、例えば符号 5 3 A, 5 3 B を付した点が MTF についてのローカルミニマムの位置を示す。この図に示したように、収差と MTF は、通常、同一のパラメータ値ではローカルミニマムとはならず、それぞれ異なるパラメータ値でローカルミニマムをとる。また、図の例では、収差については複数のローカルミニマムのうち点 5 2 B が最善の値となっているが、この点 5 2 B の近辺に位置する MTF のローカルミニマム（点 5 3 B）が、MTF についての最善の値とは限らない。図の例では、MTF についての複数のローカルミニマムのうち、点 5 3 A が最善の値となっている。

#### 【 0 0 8 3 】

図 1 6 に示したような場合、どの位置に MTF の最善の値が存在するかが分からないため、まず、収差についてのメリット関数値が良好な数個の解を選び、それぞれを出発点にして収差のウェイトや目標値を設計者が手作業で調整し、MTF がどこまで改善されるかを試みるのが従来の設計手順である。しかしながら、このような作業を設計者が手作業で行う場合、MTF 性能を実際に最適化できるのはたかだか数個の解であり、その作業にはかなりの時間を要すると考えられる。そして、むしろウェイトや目標値の調整を試みなかった解の方が MTF の性能目標により適合する可能性も残る。本実施の形態における MTF 最適化は、このような作業を自動化したものである。本実施の形態における MTF 最適化は、設計者による手作業ではなく計算機で行うので、すべてのローカルミニマムにウェイトや目標値の調整を適用することは高速に行える。そして、すべてのローカ

ルミニマムについてのMTF最適化の結果の中で、さらに最善の解を選ぶことによってMTF性能についてのグローバルな最善解を確実に発見することができる。なお、すべてのローカルミニマムについてのMTF最適化の結果の中から最善解を選ぶのは設計者が行っても良いし、例えばMTFについてのメリット関数を判断基準として、複数の解の中からメリット関数が最小になっている解を含む少なくとも一つの解のみを自動的に出力するようにしても良い。

## 【0084】

ここで、グローバル最適化とMTF最適化の組み合わせには以下の(i), (ii)のような二通りの方法が考えられる。いずれの方法においても、収差についての複数のローカルミニマムを求めるための手法には、従来からあるグローバル最適化の演算手法を用いることが可能である。グローバル最適化の機能は、例えば、ハードディスクドライブ23または記録媒体25(図1)にグローバル最適化用のプログラムをコンピュータで実行可能なプログラム形式で記録しておき、そのプログラムを主記憶装置12にロードして、CPU11が実行することにより実現される。本実施の形態においては、グローバル最適化のための機能は、図2における第1の最適化部32が有している。

## 【0085】

(i) 最初にグローバル最適化で複数のローカルミニマムを求めた後に、求められたローカルミニマムの解のすべてにMTF最適化を適用する方法

(ii) グローバル最適化でローカルミニマムの解が一つ求められるごとにその解にMTF最適化を適用する方法

## 【0086】

次に、図17を参照して、本実施の形態における最適化の処理の全体的な流れを時系列的に説明する。図17では、上記(i)の方法による最適化処理について示している。本実施の形態において、図17に示した各ステップを含む処理を行うための最適化用プログラムは、第1の実施の形態の場合と同様に、例えばハードディスクドライブ23または記録媒体25(図1)に、コンピュータで実行可能なプログラム形式で記録されている。

## 【0087】

本最適化装置では、まず、初期設定部 3 1 (図 2) によって、最適化を行うために必要とされる各種のデータの初期設定値の入力処理を行う (ステップ S 4 1)。この入力処理は、図 3 のステップ S 1 0 の処理に対応するものであるが、このステップ S 4 1 における処理には、ステップ S 1 0 で行う初期設定の内容 (構成データの初期設定や最適化に用いるパラメータの設定など) のほかに、グローバル最適化に特有の初期設定が含まれる。例えば、この入力処理には、グローバル最適化によって求めるローカルミニマムの数の設定が含まれる。

## 【 0 0 8 8 】

次に、本最適化装置は、ステップ S 4 1 での設定内容に基づいて、第 1 の最適化部 3 2 によって、収差を評価対象としたグローバル最適化の処理を開始し、ローカルミニマムの探索を行う (ステップ S 4 2)。次に、本最適化装置は、第 1 の最適化部 3 2 によって、指定の個数のローカルミニマムの解が求められたか否かを判断する (ステップ S 4 3)。指定の個数の解が求められなかった場合 (ステップ S 4 3 ; N) には、ステップ S 4 2 の処理に戻ってローカルミニマムの探索を繰り返し行う。

## 【 0 0 8 9 】

一方、指定の個数の解が求められた場合 (ステップ S 4 3 ; Y) には、第 2 の最適化部 3 3 によって、求められたローカルミニマムの解のすべてに M T F 最適化を適用する (ステップ S 4 4)。なお、例えば収差についてのメリット関数値を判断基準として、少なくとも一つの特定のローカルミニマムについてのみ M T F 最適化を適用するようにしても良い。ステップ S 4 4 は、図 3 のステップ S 3 0 の処理に対応するものであり、求められたすべての (または特定の) ローカルミニマムの解のそれぞれについて、ステップ S 3 0 以降の最適化処理を行う。これにより、M T F についての複数のローカルミニマムが求められる。その後、出力部 3 8 の機能によって、求められた M T F についての複数のローカルミニマムの解のすべてを出力する。なお、例えば M T F についてのメリット関数を判断基準として、M T F についての複数のローカルミニマムの解の中からメリット関数値が最小になっている解を含む少なくとも一つの解のみを出力するようにしても良い。

## 【 0 0 9 0 】

なお、上記 (ii) の方法による最適化処理の場合には、図 1 7 のステップ S 4 2 の後にステップ S 4 4 の M T F 最適化処理を行う。

## 【 0 0 9 1 】

以上説明したように、本実施の形態によれば、グローバル最適化と M T F 最適化とを組み合わせる M T F 性能を最終目標とした光学系の最適化を行うようにしたので、M T F 性能についてのグローバルな最善解を従来よりも高速で能率的に求めることができる。

## 【 0 0 9 2 】

## 〔実施例 2〕

次に、本実施の形態に係る光学系の最適化装置および方法を用いたレンズの最適化の具体的な数値実施例について説明する。

## 【 0 0 9 3 】

本実施例では、図 4 および図 5 に示したテッサー型の写真レンズに対して、グローバル最適化と M T F 最適化とを組み合わせる最適化処理を行う例について説明する。本実施例では、上述の第 1 の実施の形態における実施例 1 と同様に、図 6 に示した設計条件の下で、図 5 に示したレンズデータにおける曲率半径  $R_i$ 、面間隔  $D_i$ 、屈折率  $N_{di}$  およびアッベ数  $v_{di}$  の各数値をパラメータとし、以下に説明する目標値をメリット関数に含めて最適化を行った。

## 【 0 0 9 4 】

まず、収差についてのメリット関数や拘束条件の構成は、実施例 1 と同様である。次に、M T F についてのメリット関数の構成としては、図 1 8 に示す目標値を設定した。この目標値の設定は、図 7 に示した目標 1 と比較すると、画角 20 度での S 方向についての目標値が 5% 高く、60% に設定されている。他の設定は、図 7 の目標 1 と同様である。

## 【 0 0 9 5 】

図 1 9 は、以上のような条件での最適化を行うことによって得られた複数のローカルミニマムの解での収差と M T F についてのメリット関数値を示している。図 1 9 において、収差についてのメリット関数値は、M T F 最適化後の値ではな



く、MTF最適化前に求められたグローバル最適化によるローカルミニマムの値である。なお、本実施例では、グローバル最適化によって収差についての10個のローカルミニマムが自動的に求められたが、図19では、説明を簡略化するため、すべての解ではなく、これらのローカルミニマムのうち明らかに収差が大きい5個の解を除いたその他の5個の解（解番号1～5）に対してMTF最適化を適用した例を示す。

## 【0096】

図19において、解番号1は、最適化の出発点から直接に到達できるローカルミニマムであるため、実質的には、解番号2から5がグローバル最適化によって求められたローカルミニマムである。メリット関数値は小さい方が性能が良いことを示しているので、図19から、解番号3がMTFについての最善解であることが分かる。この最善解についてのレンズデータを図20に示す。図20における各符号の意味は図5のレンズデータと同様である。

## 【0097】

図21～図25は、それぞれ解番号1～5に対応する写真レンズ1-1～1-5のレンズ形状を示している。図21～図25に付した各符号の意味は図4と同様である。また、図26～図30は、それぞれ写真レンズ1-1～1-5のMTF性能を示している。図26～図30に付した各符号の意味は図14と同様である。

## 【0098】

以上説明したように、本実施例によれば、従来のグローバル最適化に比べて良好にMTFについての最適化を図ることができた。

## 【0099】

なお、本発明は、上記各実施の形態に限定されず種々の変形実施が可能である。例えば、上記各実施の形態では、設計目標がMTFで表現される場合について説明したが、本発明は、設計目標が点像分布関数の半値幅など、非線形性が大きく計算時間がかかる量で表現されている場合について広く適用することが可能である。また本発明は、設計目標がRMSスポットサイズなど、収差によるメリット関数として表現できる量で表現される光学特性についても、適用することが可能である。この場合、サンプル物点ごとの目標値を満たすようにサンプル物点ご

との収差についてのウェイトを調整できることが従来の最適化にはない機能である。より一般的には、例えばサンプル物点ごとの目標値を満たすようにサンプル物点ごとの収差についてのウェイトなどを調整することを必要とするような他の光学特性についても、本発明は有効である。

#### 【0100】

また、上記第2の実施の形態では、グローバル最適化によってローカルミニマムを求めた後、求められたローカルミニマムについて、MTFの評価が所望の値に近づくように収差に関するウェイトや目標値を自動調整する例について説明した。しかしながら、このような収差に関するウェイトおよび目標値の自動調整を行わずに、求められたローカルミニマムに対して、直接にMTFを評価対象とした最適化の演算を行うようにしても良い。

#### 【0101】

##### 【発明の効果】

以上説明したように、請求項1もしくは請求項2～14のいずれか1項に記載の光学系の最適化方法、請求項15もしくは請求項16記載の光学系の最適化装置、または請求項17もしくは請求項18記載の光学系の最適化用プログラムを記録した記録媒体によれば、少なくとも第1の光学特性と比較して光学系の設計パラメータに対する非線形性が相対的に強い第2の光学特性についての光学系の評価結果に基づいて、第2の光学特性が、第2の光学特性についての所望の目標値に近づくように、第1の光学特性についての最適化用の関数の自動調整を行い、この自動調整された後の関数に基づいて、最適化が行われた後の光学系に対して、再度最適化を行うようにしたので、設計者によって行われていたウェイトや目標値の調整といった従来の作業と同等の機能を、自動化することができる。これにより、従来に比べて高速で能率的に、MTFなどの非線形性の強い光学特性についての最適化を図ることができる。

#### 【0102】

特に、請求項14記載の光学系の最適化方法によれば、グローバル最適化を行うことにより求められた複数の局所的な最適解のそれぞれについて、第1の関数の自動調整を行うようにしたので、例えばMTF性能についてのグローバルな最

善解を従来よりも高速で能率的に求めることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の第 1 の実施の形態に係る光学系の最適化装置のハードウェア構成を示すブロック図である。

【図 2】

本発明の第 1 の実施の形態に係る光学系の最適化装置の機能的な構成を示す機能ブロック図である。

【図 3】

本発明の第 1 の実施の形態に係る光学系の最適化装置の機能によって実現される光学系の最適化方法の処理動作の手順を示す流れ図である。

【図 4】

本発明の第 1 の実施の形態に係る光学系の最適化装置および方法を用いたレンズの最適化の具体的な数値実施例において、最適化の出発点のレンズについての形状を示す断面図である。

【図 5】

図 4 に示したレンズの具体的なレンズデータを示す説明図である。

【図 6】

図 4 に示したレンズについての設計条件を示す説明図である。

【図 7】

本発明の第 1 の実施の形態におけるレンズの最適化に用いた具体的な M T F の目標値の設定を示す説明図である。

【図 8】

図 7 に示した第 1 の目標値を用いた最適化の結果を示す説明図である。

【図 9】

図 7 に示した第 2 の目標値を用いた最適化の結果を示す説明図である。

【図 1 0】

図 7 に示した第 1 の目標値を用いた最適化によって得られたレンズデータを示す説明図である。

【図 1 1】

図 7 に示した第 2 の目標値を用いた最適化によって得られたレンズデータを示す説明図である。

【図 1 2】

図 7 に示した第 1 の目標値を用いた最適化によって得られたレンズの形状を示す断面図である。

【図 1 3】

図 7 に示した第 2 の目標値を用いた最適化によって得られたレンズの形状を示す断面図である。

【図 1 4】

図 7 に示した第 1 の目標値を用いた最適化によって得られたレンズについての M T F 性能を示す特性図である。

【図 1 5】

図 7 に示した第 2 の目標値を用いた最適化によって得られたレンズについての M T F 性能を示す特性図である。

【図 1 6】

グローバル最適化の概念について示す説明図である。

【図 1 7】

本発明の第 2 の実施の形態に係る光学系の最適化装置の機能によって実現される光学系の最適化方法の処理動作の手順を示す流れ図である。

【図 1 8】

本発明の第 2 の実施の形態におけるレンズの最適化に用いた具体的な M T F の目標値の設定を示す説明図である。

【図 1 9】

本発明の第 2 の実施の形態におけるレンズの最適化を、図 1 8 に示した目標値を用いて行った場合に得られたメリット関数値を示す説明図である。

【図 2 0】

図 1 9 における 3 つ目の解についてのレンズデータを示す説明図である。

【図 2 1】

図 1 9 における 1 つ目の解についてのレンズの形状を示す断面図である。

【図 2 2】

図 1 9 における 2 つ目の解についてのレンズの形状を示す断面図である。

【図 2 3】

図 1 9 における 3 つ目の解についてのレンズの形状を示す断面図である。

【図 2 4】

図 1 9 における 4 つ目の解についてのレンズの形状を示す断面図である。

【図 2 5】

図 1 9 における 5 つ目の解についてのレンズの形状を示す断面図である。

【図 2 6】

図 1 9 における 1 つ目の解についての M T F 性能を示す特性図である。

【図 2 7】

図 1 9 における 2 つ目の解についての M T F 性能を示す特性図である。

【図 2 8】

図 1 9 における 3 つ目の解についての M T F 性能を示す特性図である。

【図 2 9】

図 1 9 における 4 つ目の解についての M T F 性能を示す特性図である。

【図 3 0】

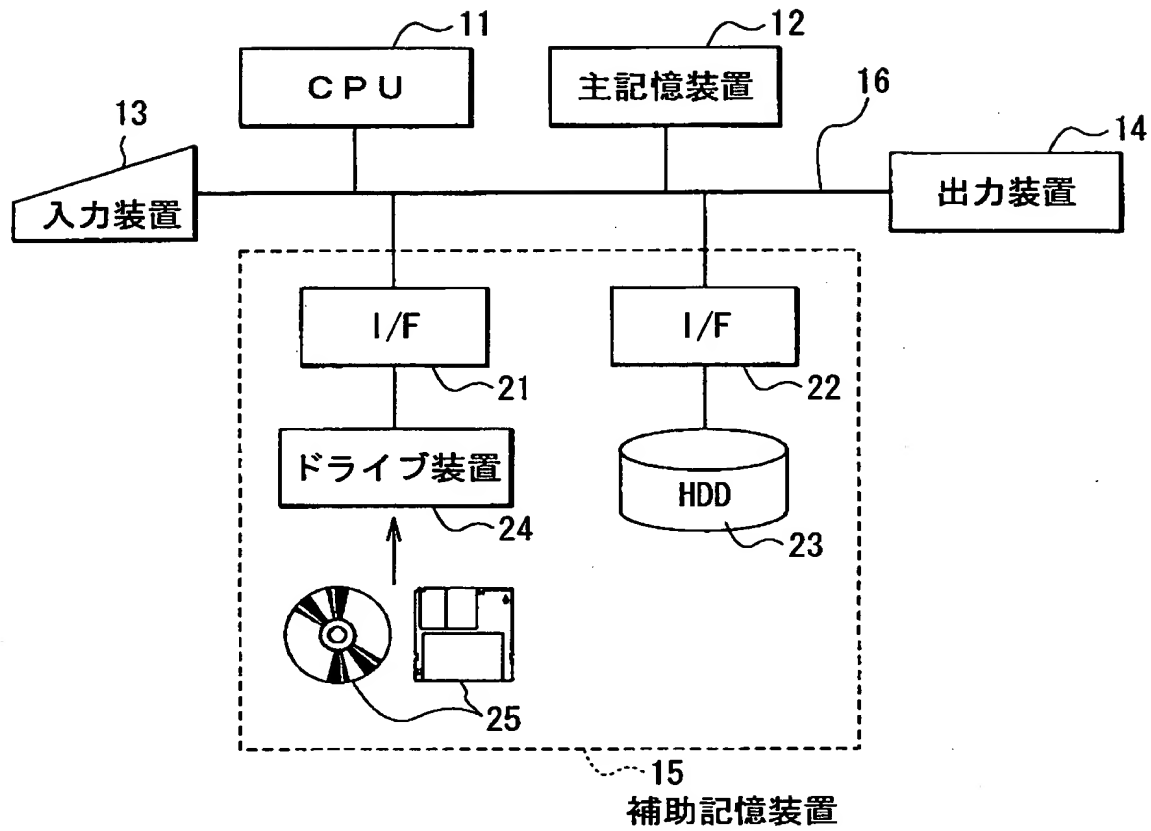
図 1 9 における 5 つ目の解についての M T F 性能を示す特性図である。

【符号の説明】

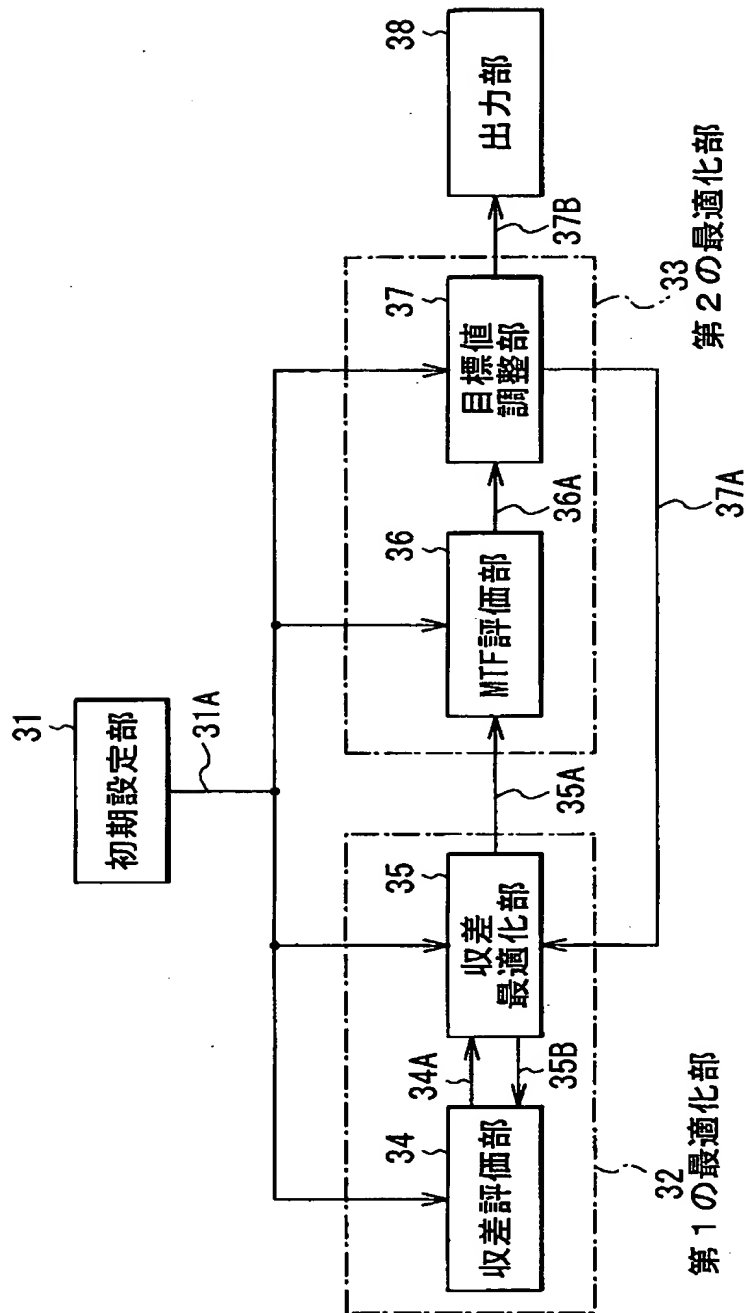
1 1 … C P U、1 2 … 主記憶装置、1 3 … 入力装置、1 4 … 出力装置、1 5 … 補助記憶装置、1 6 … バス、2 1, 2 2 … インタフェース ( I / F )、2 3 … ハードディスクドライブ ( H D D )、2 4 … ドライブ装置、3 1 … 初期設定部、3 2 … 第 1 の最適化部と、3 3 … 第 2 の最適化部と、3 4 … 収差評価部、3 5 … 収差最適化部、3 8 … 出力部。

【書類名】 図面

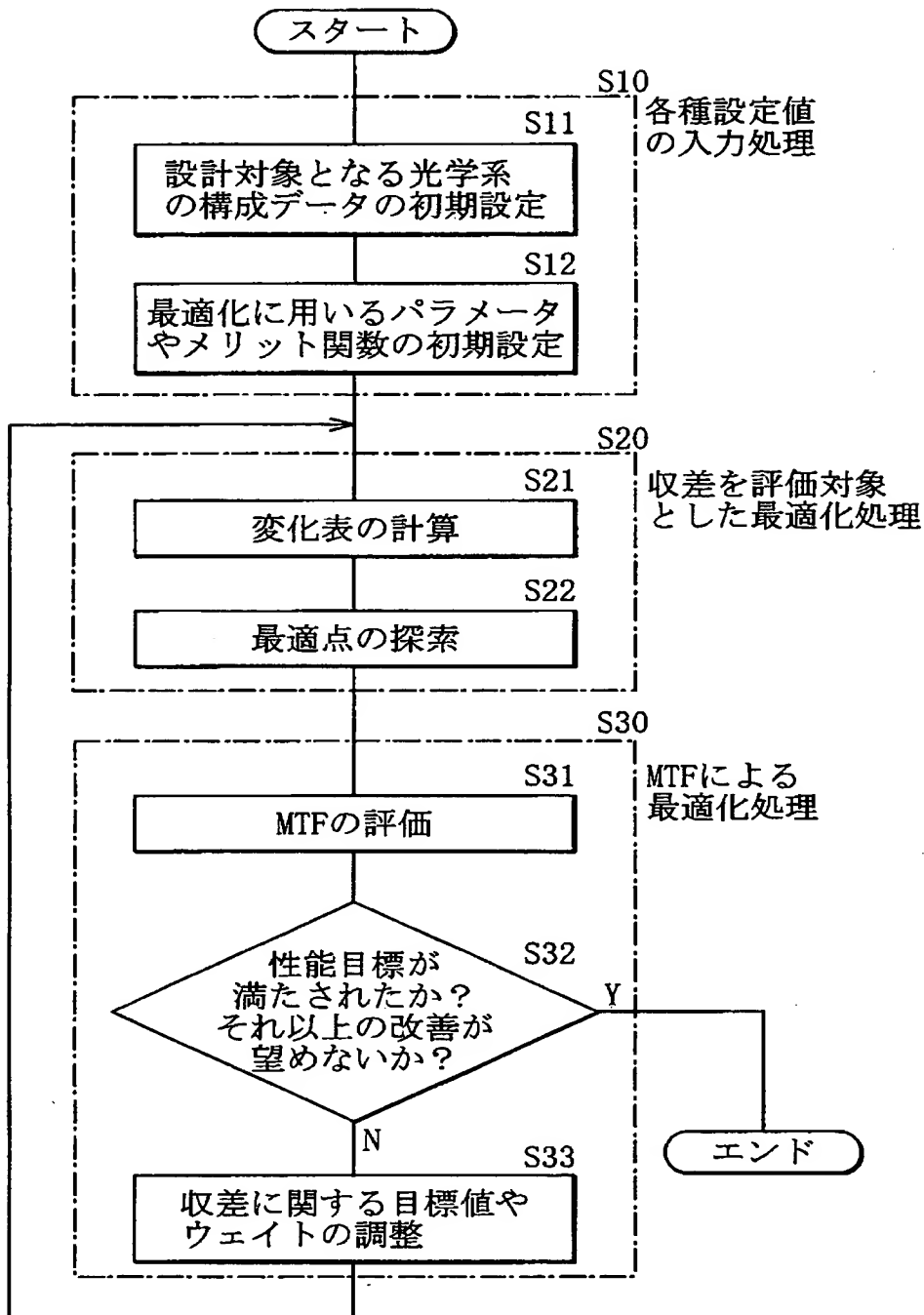
【図 1】



【図 2】

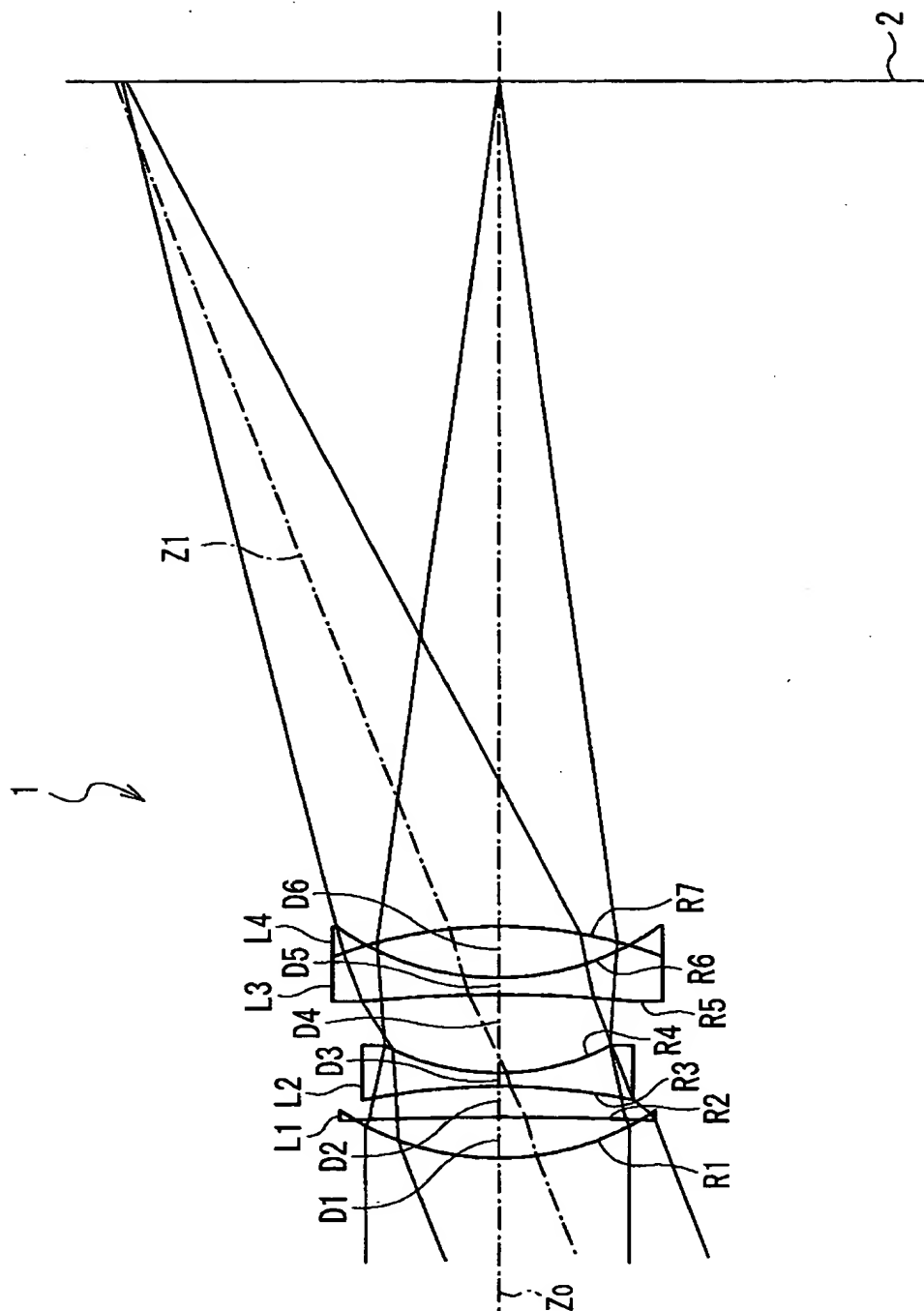


【図 3】





【図 4】



【図 5】

出発点のレンズデータ				
S i (面番号)	R i (曲率半径)	D i (面間隔)	N d i (屈折率)	$\nu$ d i (アッベ数)
1	13.1502	2.0817	1.60800	56.5
2	-128.4561	1.4724		
3	-30.7685	0.8631	1.56000	45.3
4	11.9825	4.0111		
5	-73.1134	0.8631	1.56000	45.3
6	12.6425	2.5894	1.61600	55.0
7	-20.0046	0.0000		

【図 6】

設計条件	
焦点距離 f	50mm
Fno.	4.0
物点位置	無限遠
半画角 $\omega$	20度
サンプル物点	中心、半画角14度、半画角20度
MTFの評価周波数	40cs/mm
サンプル波長	435.8nm, 546.1nm, 656.3nm
波長ウェイト	1, 1, 1
ディストーション	1%以内
口径蝕	なし

【図 7】

MTFの目標値				
画角	目標 1		目標 2	
	S 方向	T 方向	S 方向	T 方向
中心	65%		57%	
14度	55%	65%	57%	65%
20度	55%	65%	57%	65%

【図 8】

目標 1 での結果						
画 角	M T F		ウェイトの調整比		たて収差の平均の目標値 ( $\mu\text{m}$ )	
	S 方向	T 方向	S 方向	T 方向	S 方向	T 方向
中心	64%		1.2		13.6	
14度	55%	64%	1.5	1.1	11.7	-12.4
20度	54%	64%	0.7	1.8	-11.6	-34.2

【図 9】

目標 2 での結果						
画 角	M T F		ウェイトの調整比		たて収差の平均の目標値 ( $\mu\text{m}$ )	
	S 方向	T 方向	S 方向	T 方向	S 方向	T 方向
中心	56%		1.0		15.3	
14度	57%	65%	1.5	0.9	16.0	-10.7
20度	57%	64%	0.8	1.5	-10.8	-34.0

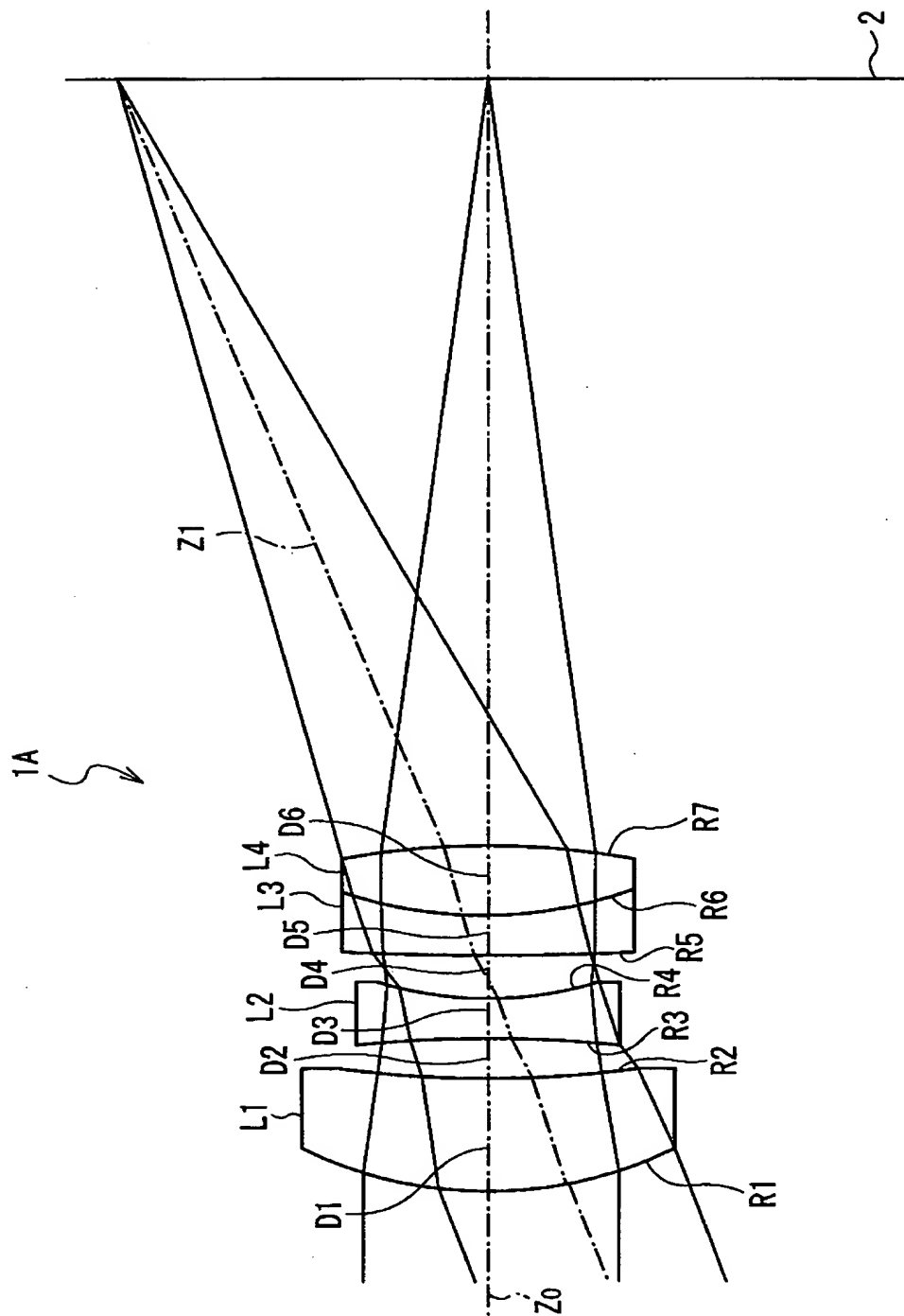
【図 10】

目標 1 での解のレンズデータ				
S i (面番号)	R i (曲率半径)	D i (面間隔)	N d i (屈折率)	$\nu$ d i (アッペ数)
1	18.9178	5.9592	1.79080	48.9
2	48.4813	2.0454		
3	-56.2882	2.0000	1.66405	32.6
4	17.1377	2.3758		
5	120.5964	2.0710	1.57937	40.1
6	20.0136	3.8850	1.80000	48.0
7	-34.3802	0.0000		

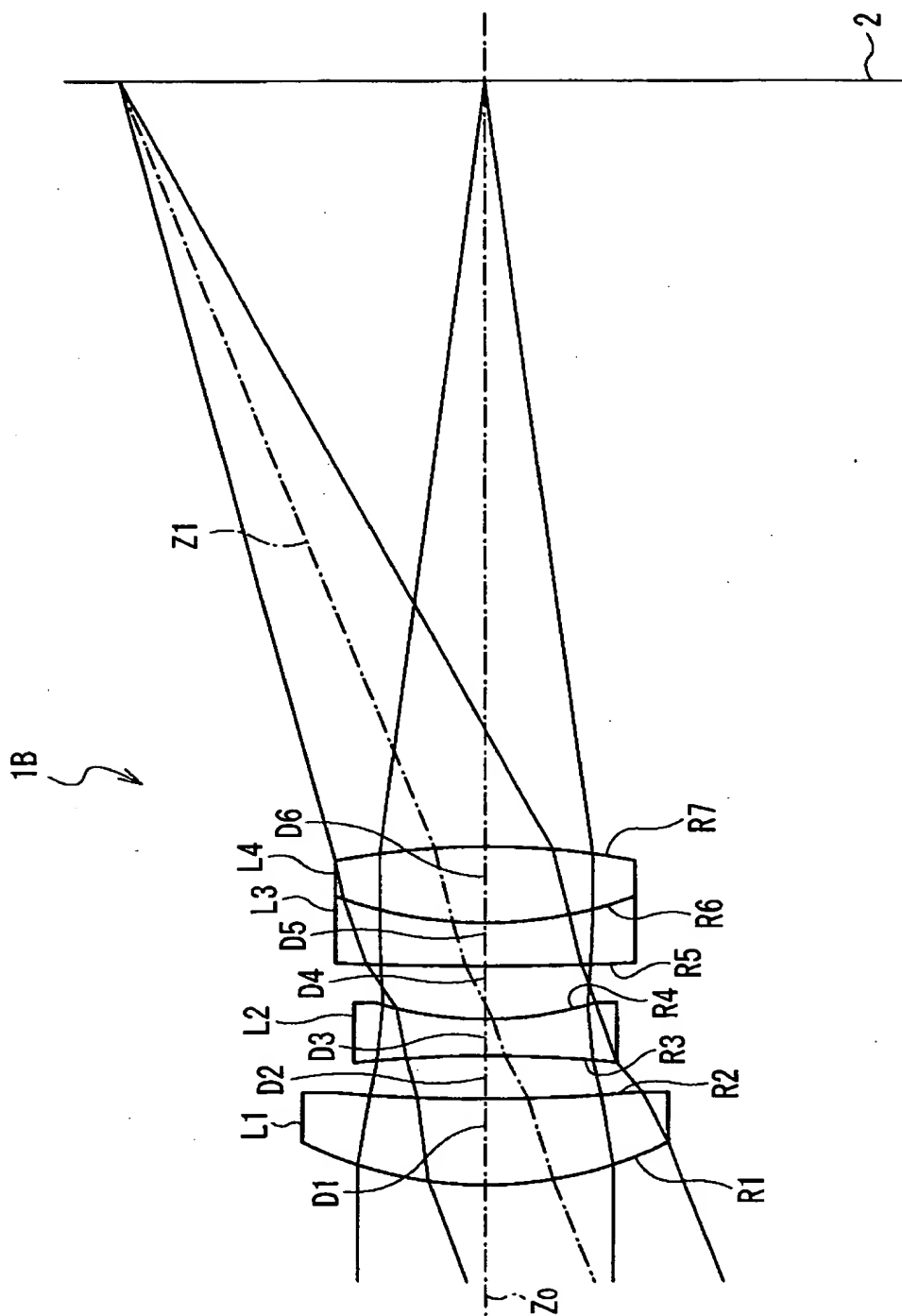
【図 1 1】

目標 2 での解のレンズデータ				
S i (面番号)	R i (曲率半径)	D i (面間隔)	N d i (屈折率)	$\nu$ d i (アッベ数)
1	18.4608	4.5462	1.80000	48.0
2	59.1162	2.3640		
3	-69.4418	2.0000	1.67159	32.1
4	16.3997	2.8414		
5	294.9039	2.2763	1.57555	40.8
6	20.8082	3.9552	1.80000	48.0
7	-35.6773	0.0000		

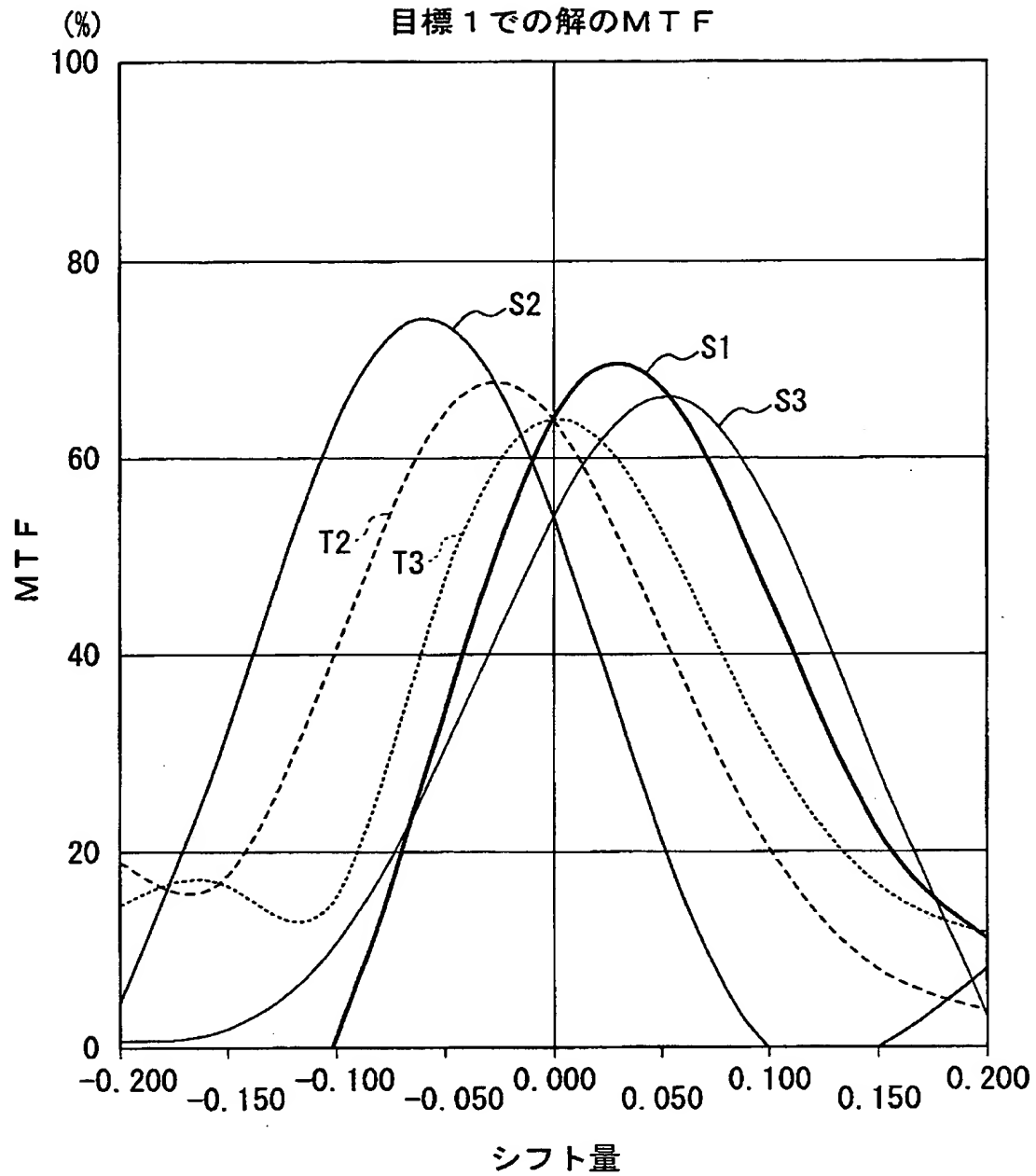
【図 12】



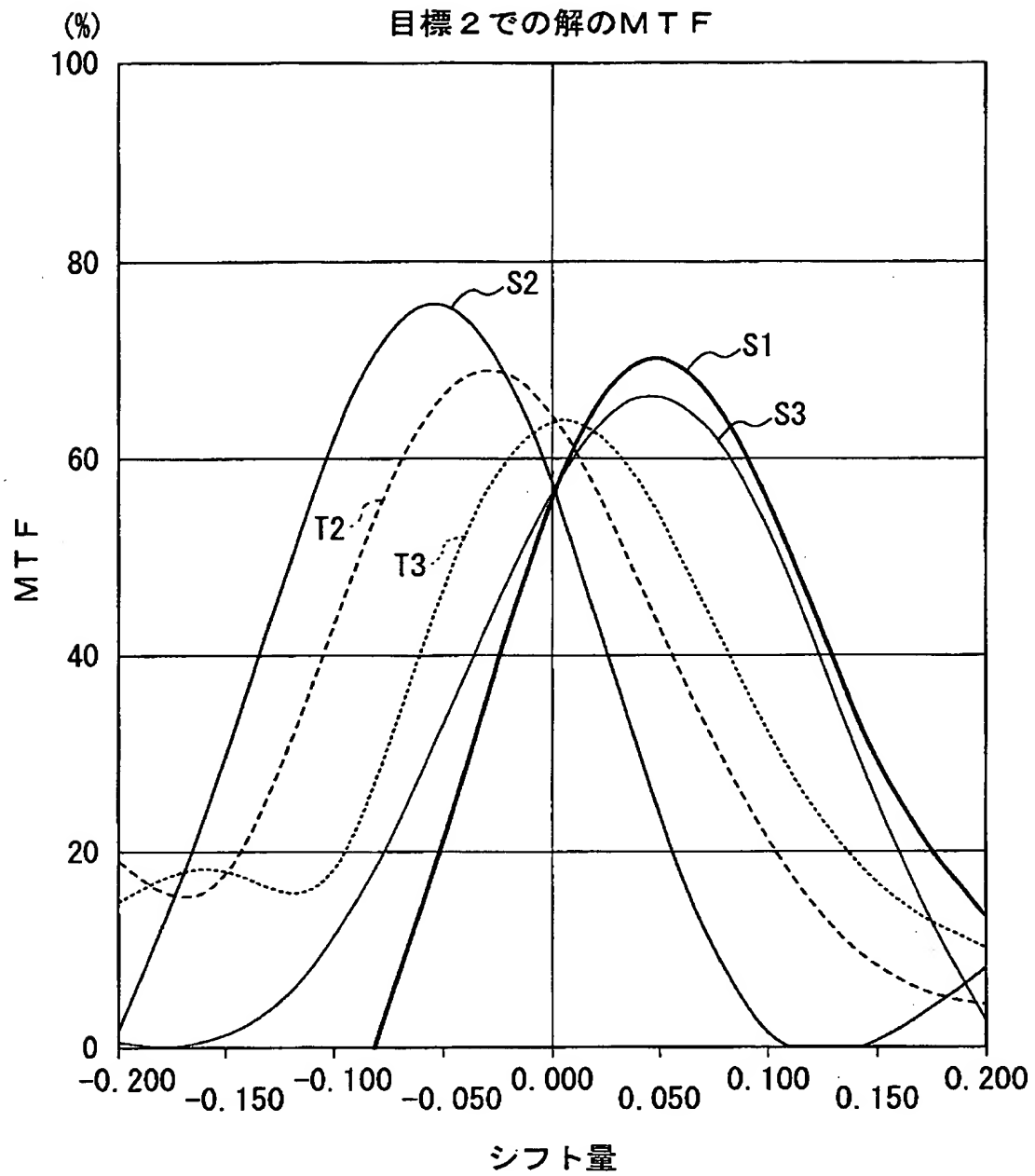
【図 13】



【図 1 4】

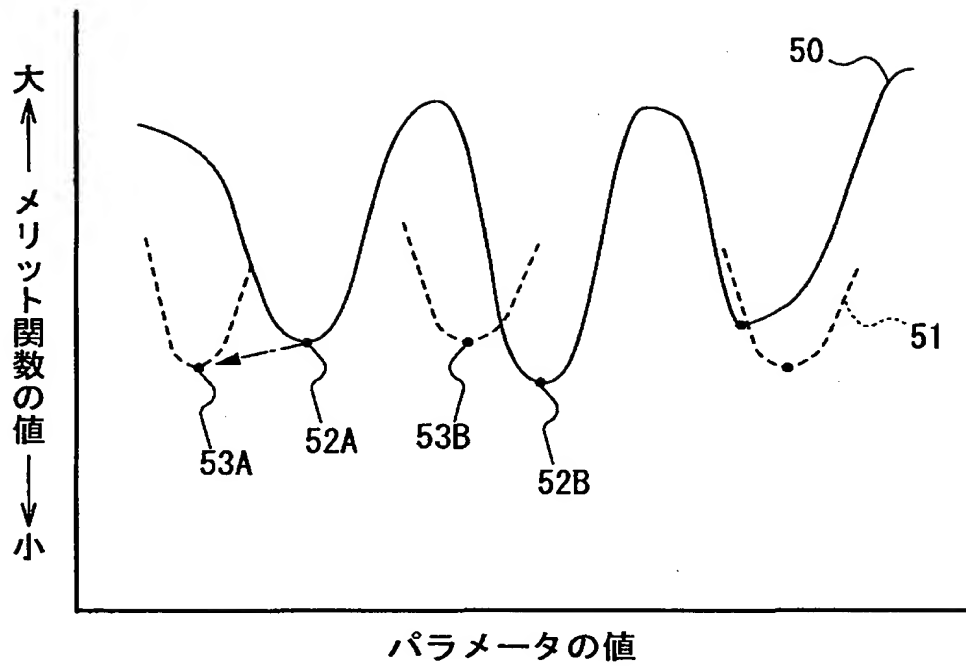


【図 1 5】

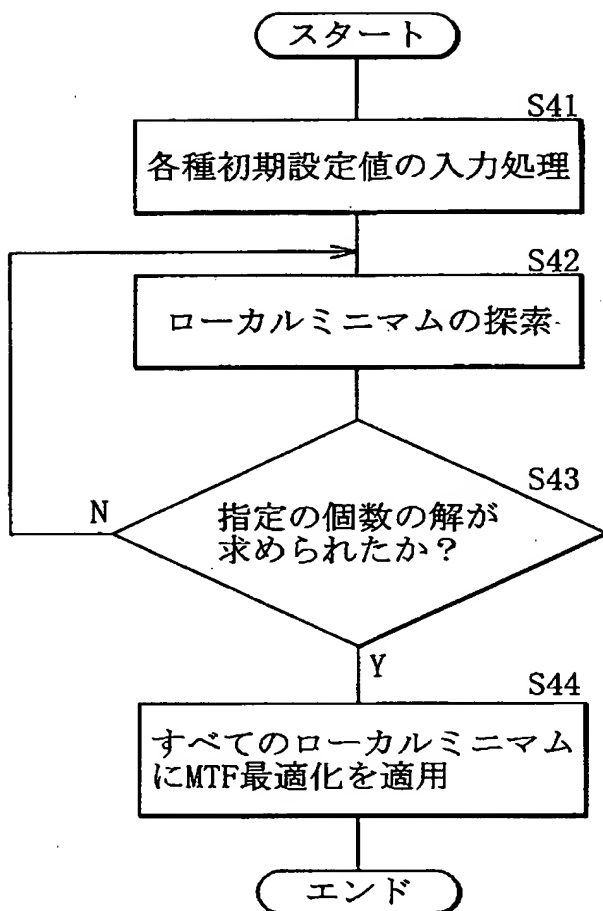




【図 1 6】



【図 1 7】



【図 1 8】

MTFの目標値		
画角	目標	
	S 方向	T 方向
中心	65%	
14度	55%	65%
20度	60%	65%

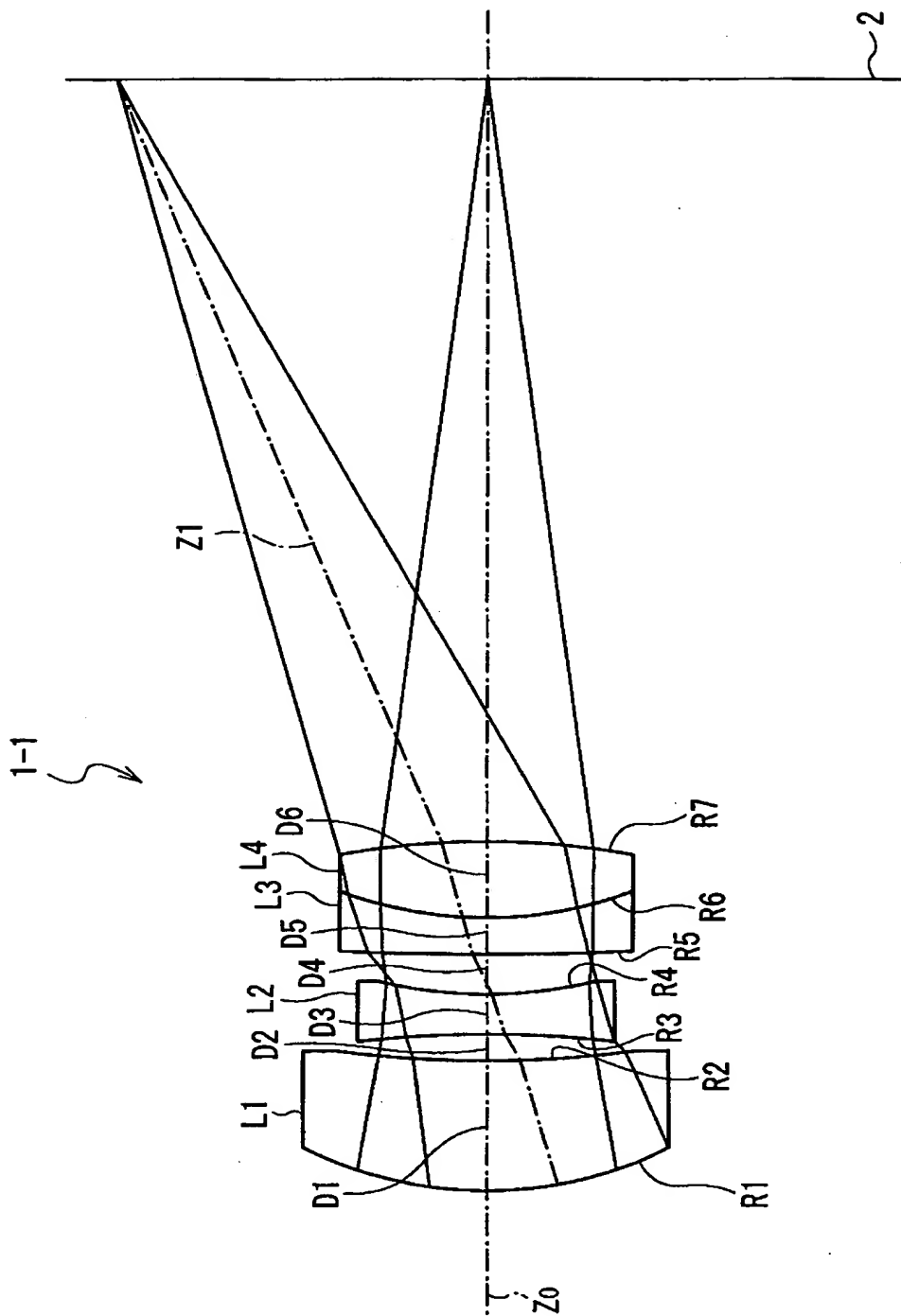
【図 1 9】

解 番 号	メリット関数値	
	収差	MTF
1	0.001598	10.3%
2	0.001543	10.7%
3	0.001539	2.7%
4	0.001549	7.7%
5	0.001539	6.5%

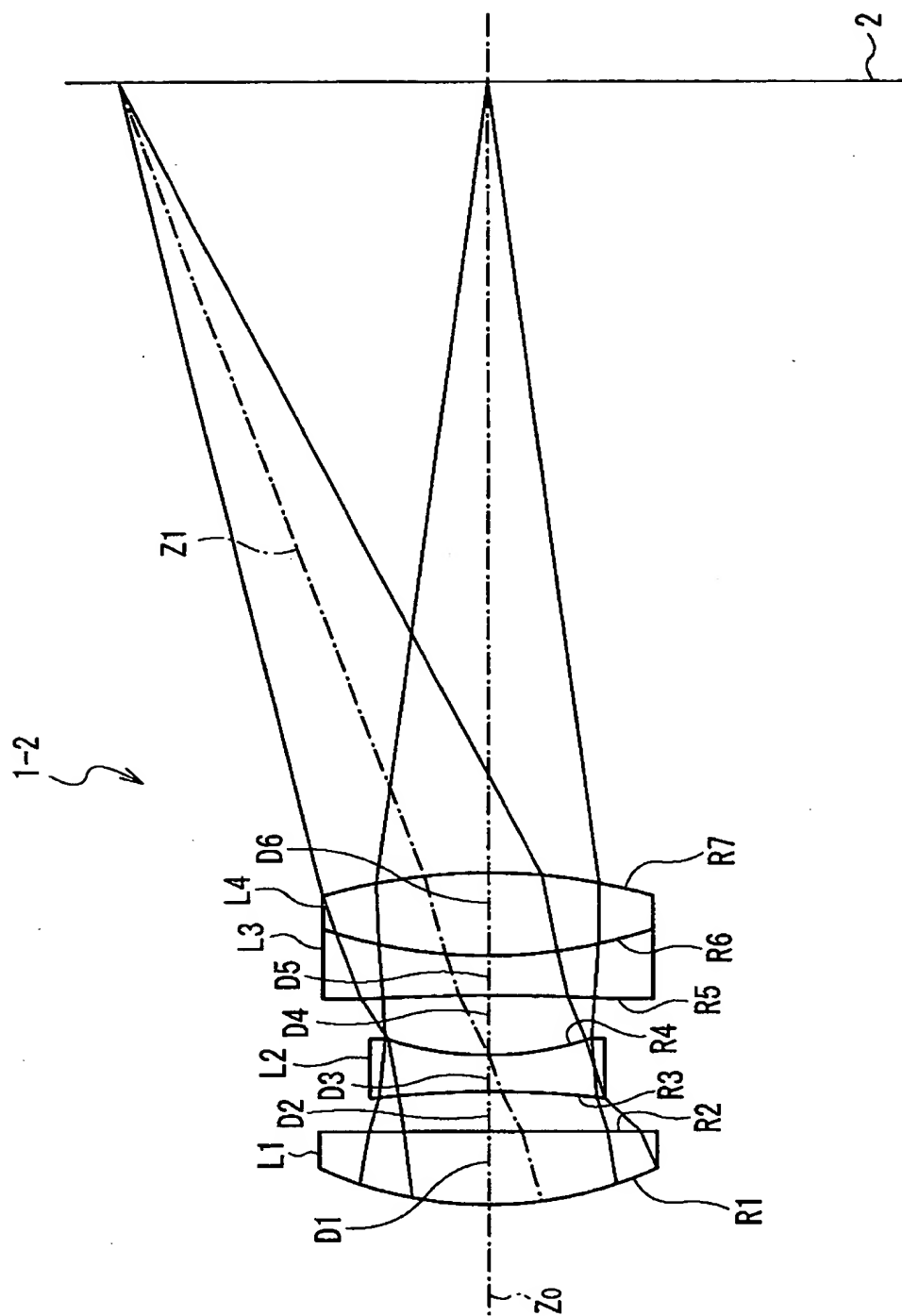
【図 2 0】

解番号 3 でのレンズデータ				
S i (面番号)	R i (曲率半径)	D i (面間隔)	N d i (屈折率)	$\nu$ d i (アッベ数)
1	19.8762	5.4071	1.80000	43.8
2	-282.4339	1.6230		
3	-43.4813	2.0000	1.72558	30.2
4	16.8887	3.6591		
5	-127.0678	2.0000	1.67193	44.0
6	19.2644	5.2366	1.80000	48.0
7	-28.2142	0.0000		

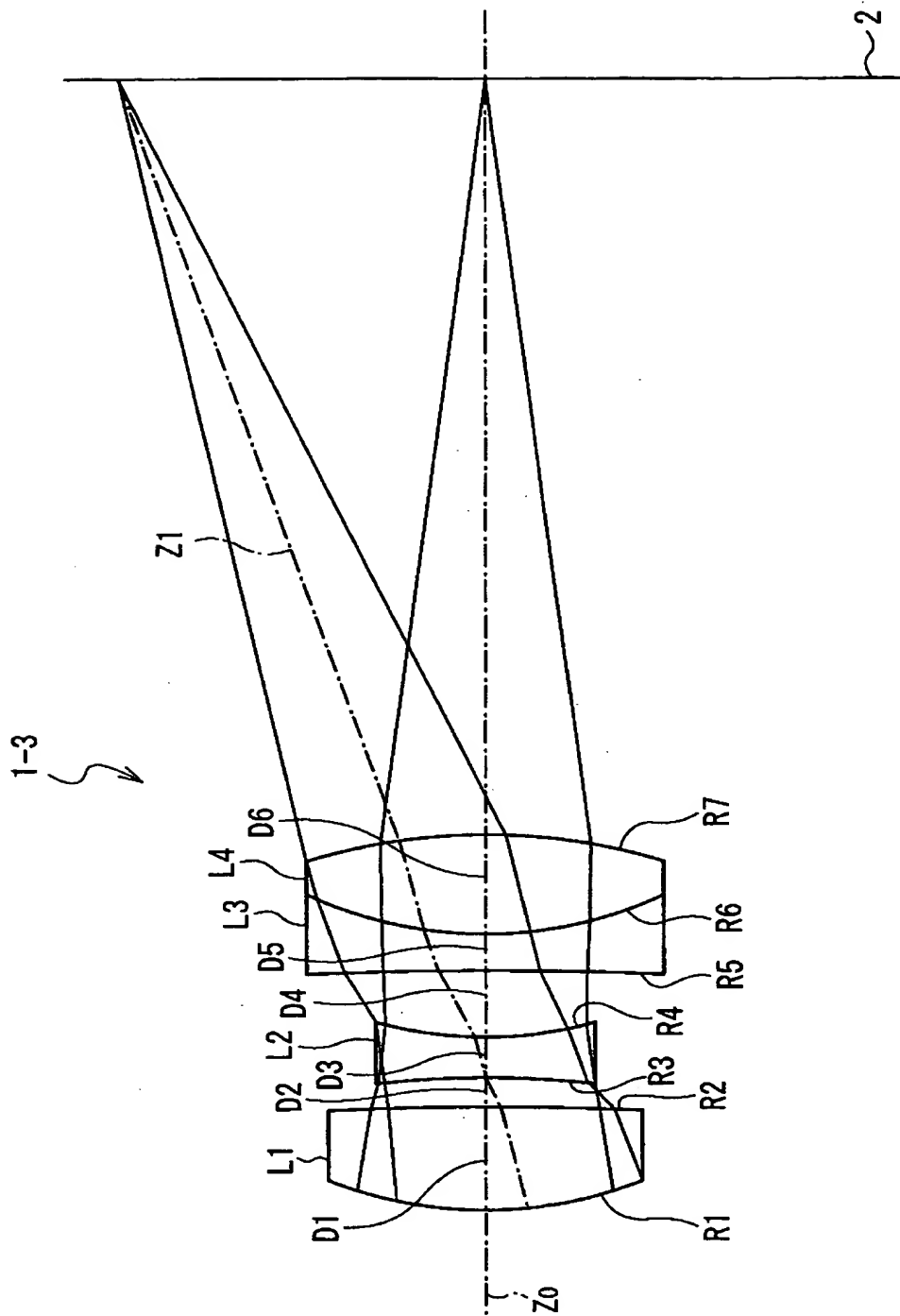
【図 21】



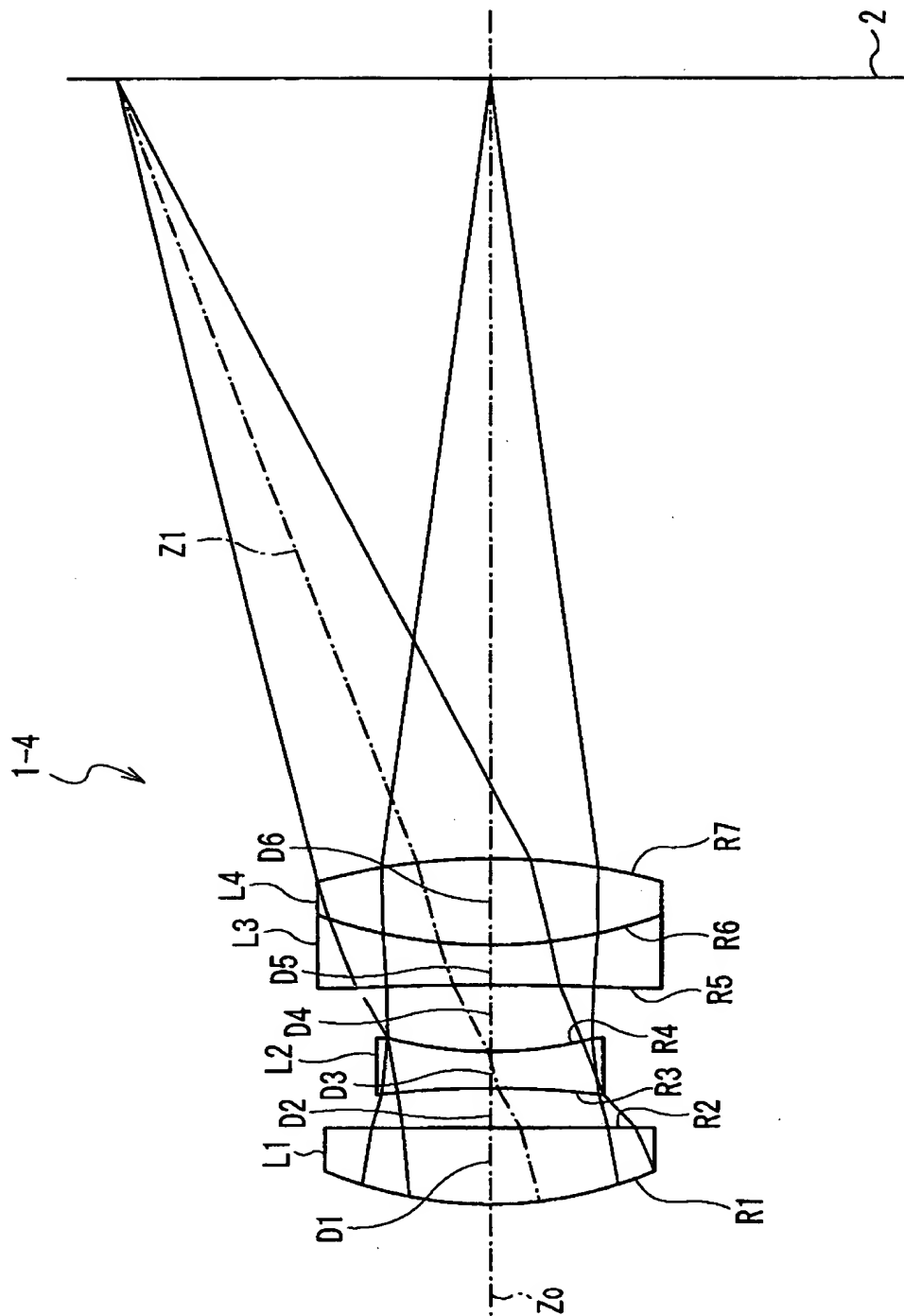
【図 22】



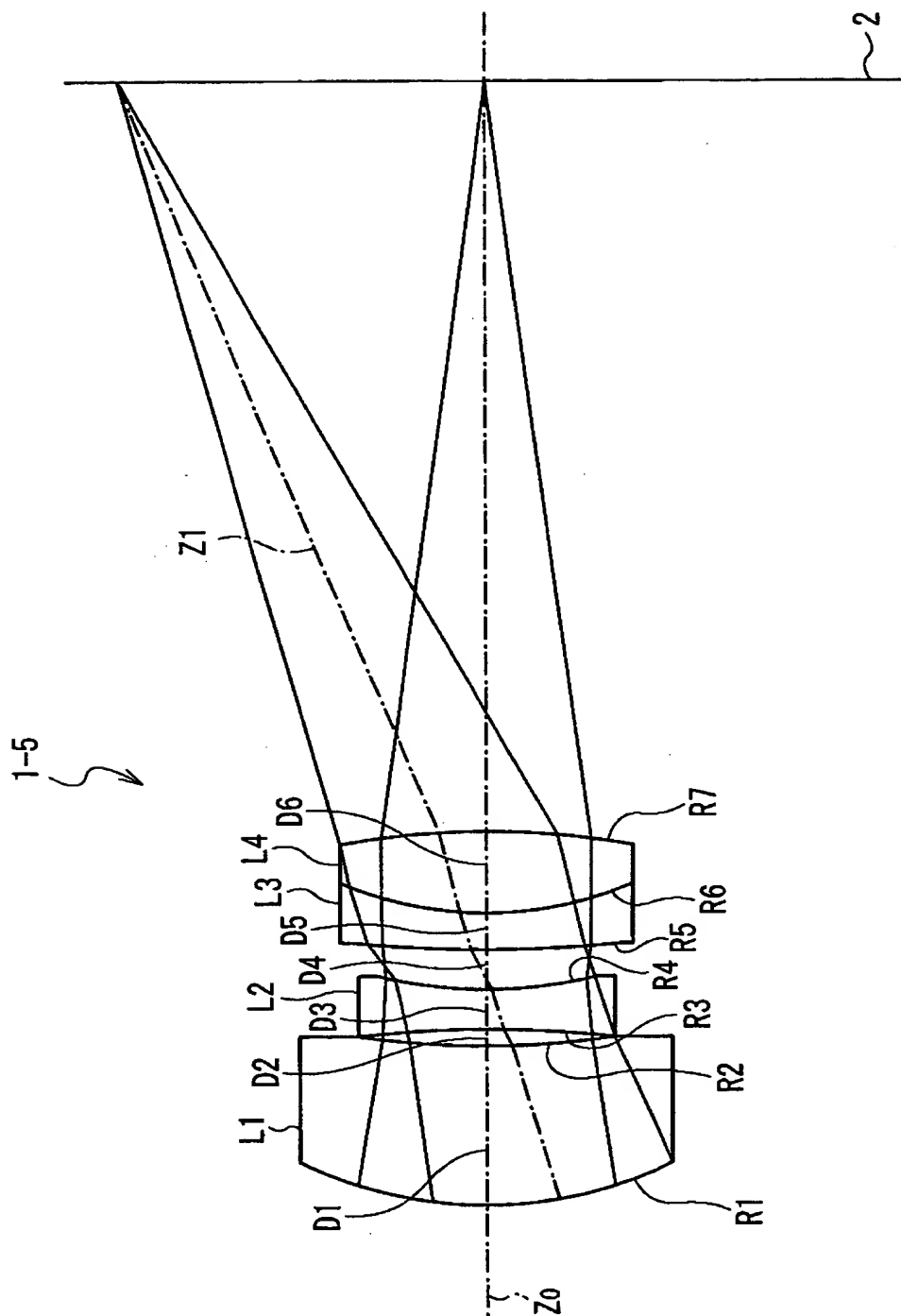
【図 2 3】



【図 2 4】

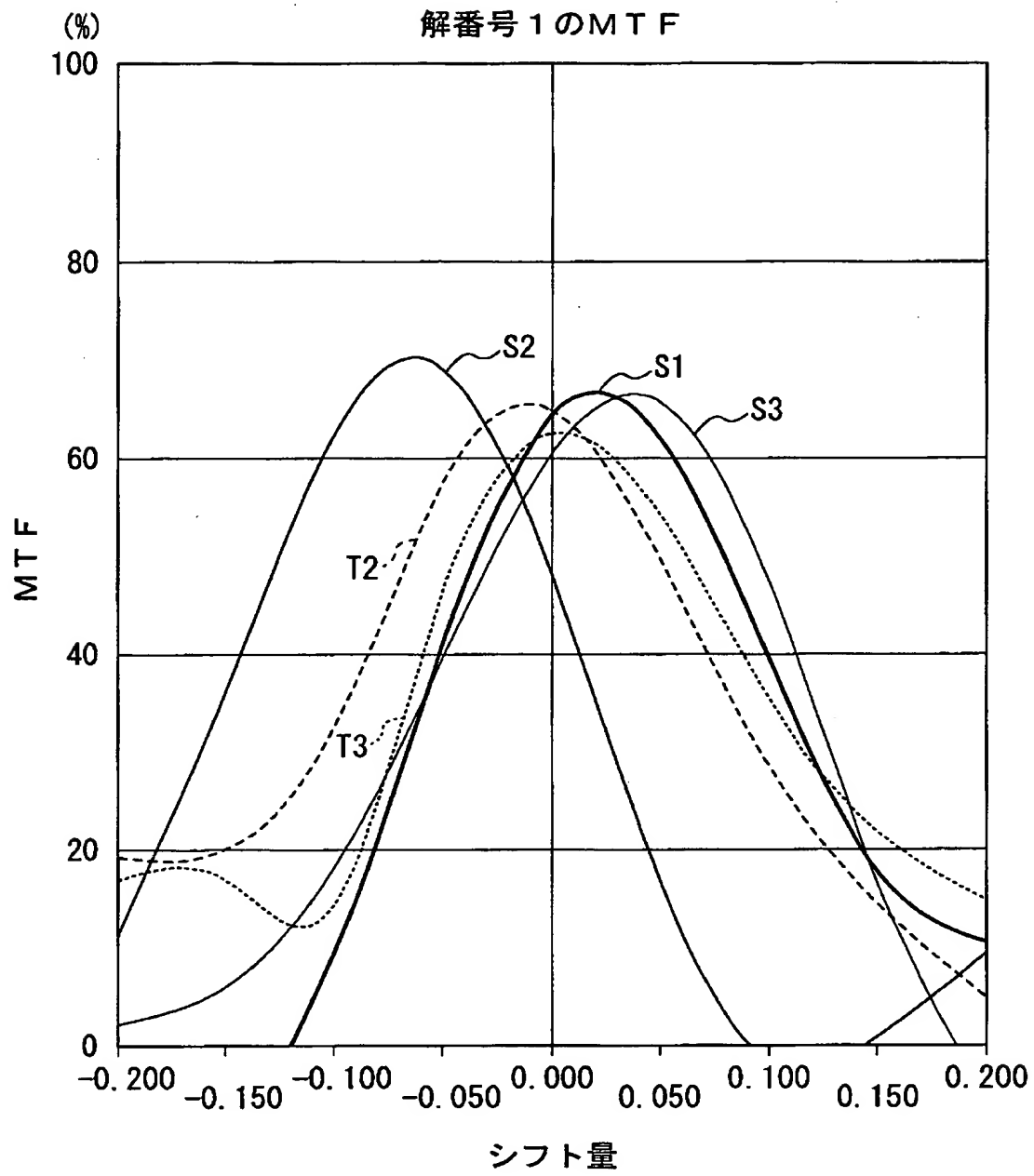


【図 2 5】

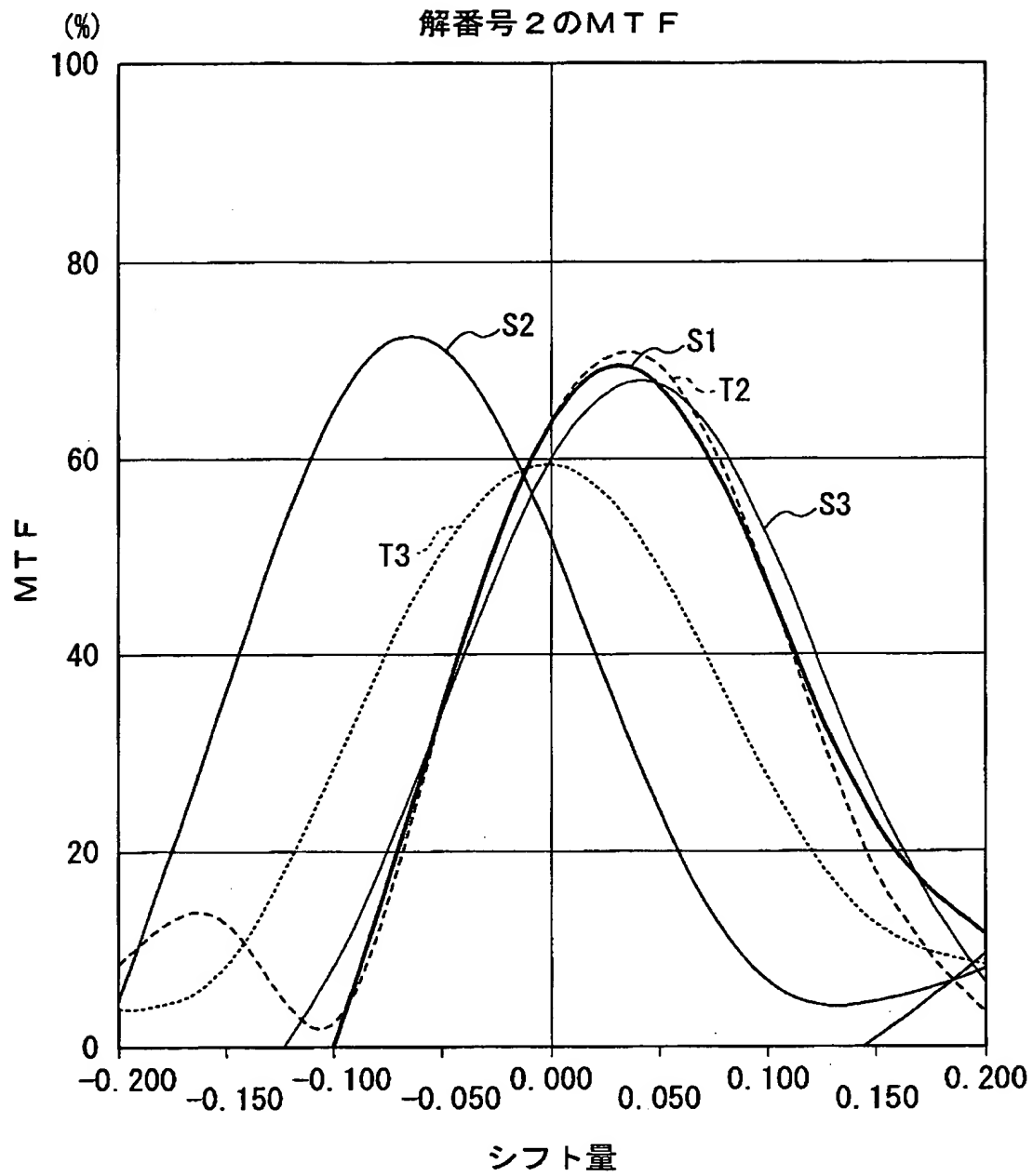




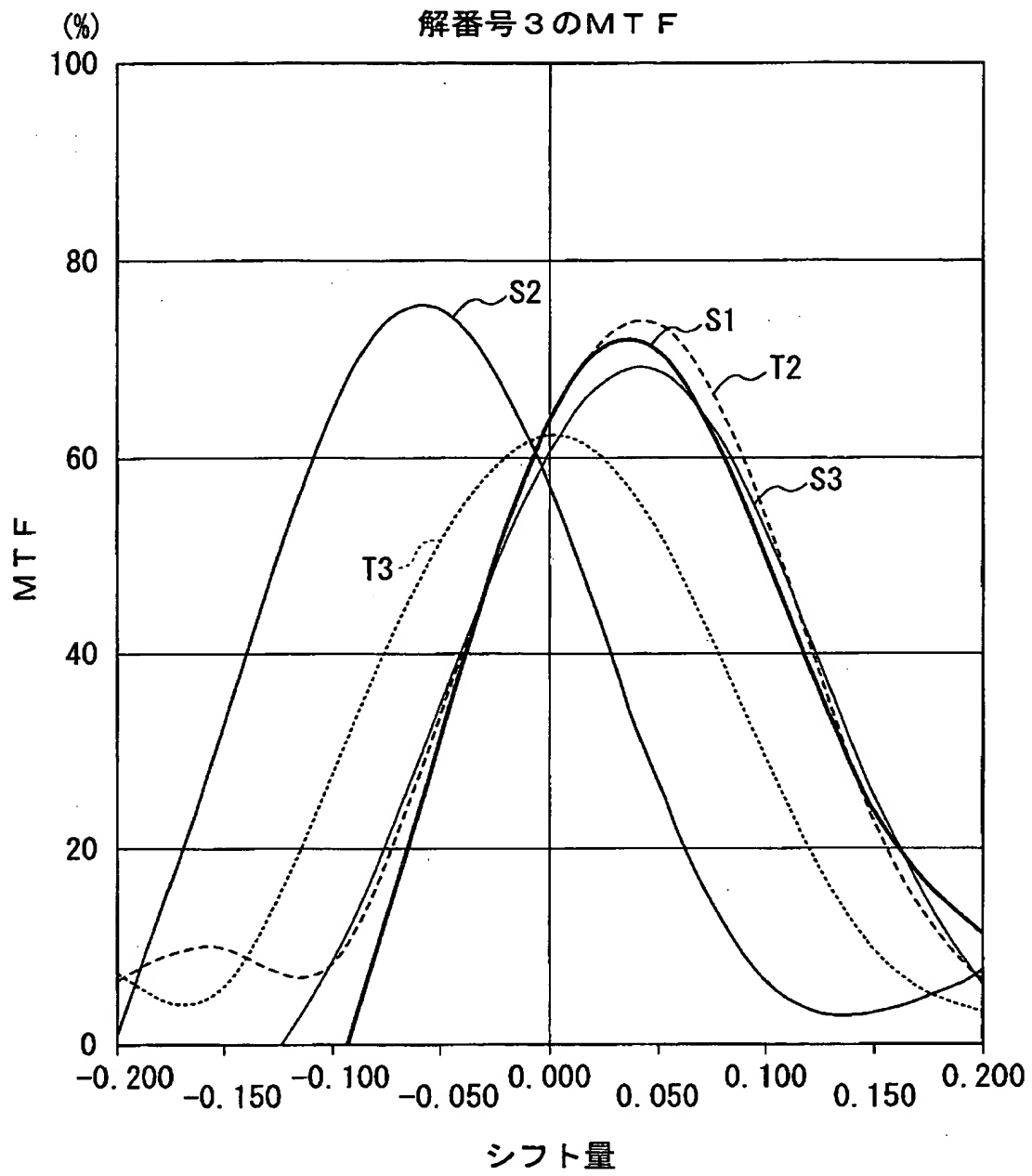
【図 2 6】



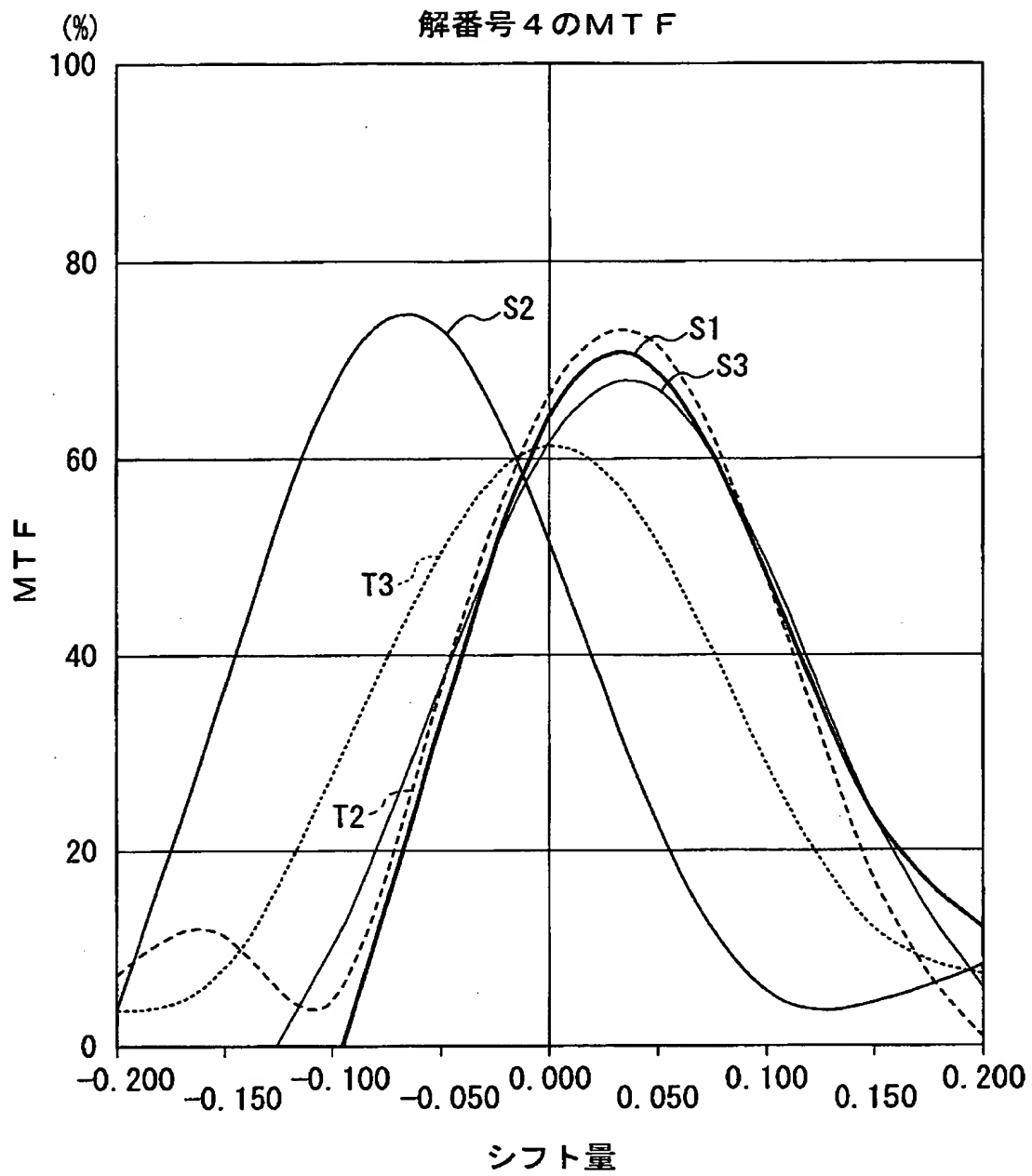
【図 2 7】



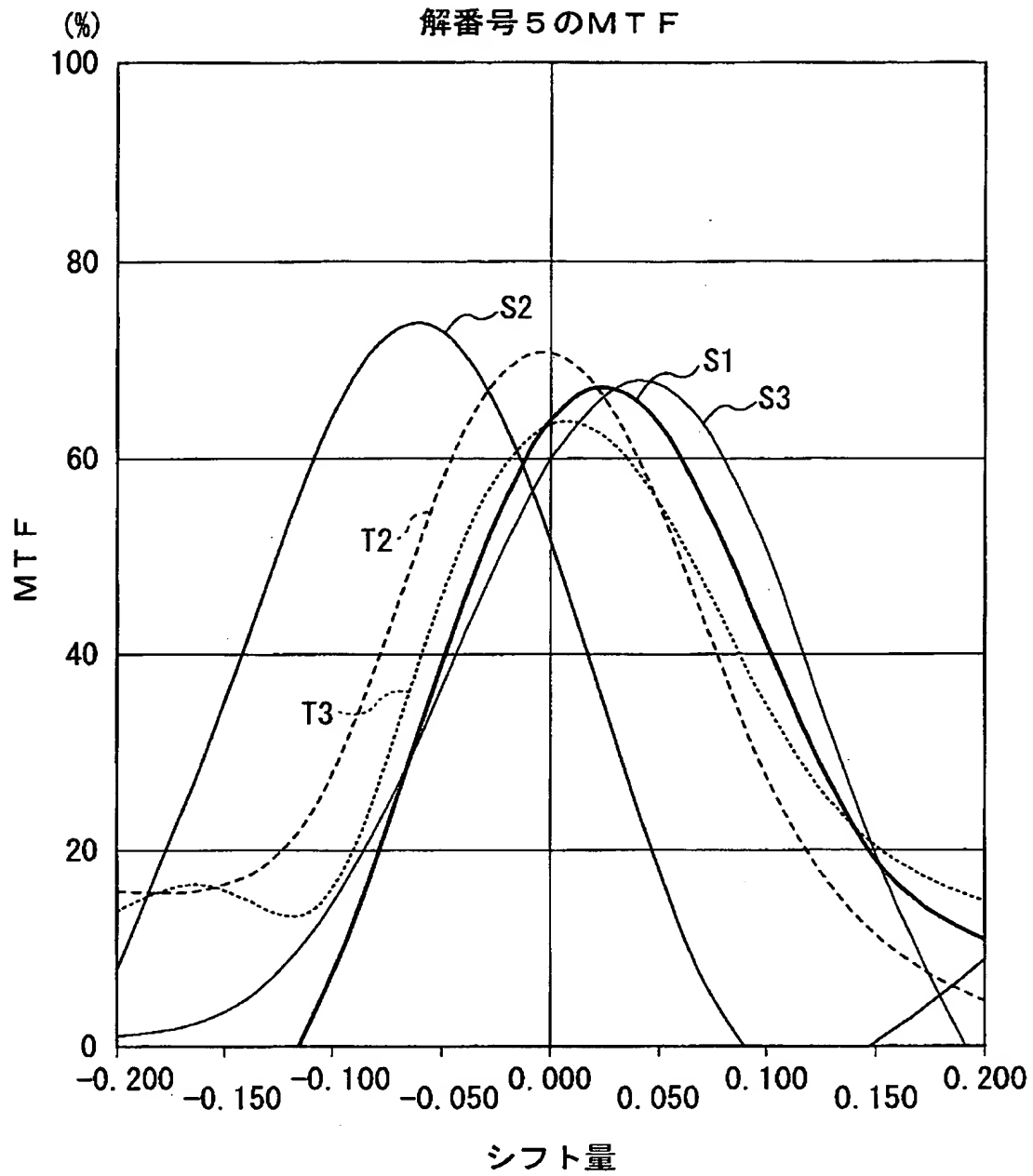
【図 2 8】



【図 2 9】



【図 3 0】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 従来に比べて高速で能率的に、MTFなどの非線形性の強い光学特性についての最適化を図る。

【解決手段】 第1の最適化部32によって、収差を評価対象としたメリット関数を用いて光学系の最適解を求める。次に、第2の最適化部33によって、そのメリット関数に含まれる収差に関するウェイトや目標値を、MTFなどの評価が所望の値に近づくように自動調整する。第1の最適化部32は、この自動調整された後のウェイトや目標値を用いて、再度、光学系の最適化を行う。これにより、従来、設計者によって行われていたウェイトや目標値の調整といった作業と同等の機能が自動化される。

【選択図】 図2

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2000-335631
受付番号	50001421698
書類名	特許願
担当官	高田 良彦 2319
作成日	平成 12 年 11 月 9 日

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】

【識別番号】	000005430
【住所又は居所】	埼玉県大宮市植竹町 1 丁目 3 2 4 番地
【氏名又は名称】	富士写真光機株式会社

【代理人】

申請人

【識別番号】	100109656
【住所又は居所】	東京都新宿区新宿 1 丁目 9 番 5 号 大台ビル 2 階 翼国際特許事務所

【氏名又は名称】	三反崎 泰司
----------	--------

【代理人】

【識別番号】	100098785
【住所又は居所】	東京都新宿区新宿 1 丁目 9 番 5 号 大台ビル 2 階 翼国際特許事務所

【氏名又は名称】	藤島 洋一郎
----------	--------

出 願 人 履 歷 情 報

識別番号 [000005430]

1. 変更年月日 1990年 8月14日

[変更理由] 新規登録

住 所 埼玉県大宮市植竹町1丁目324番地  
氏 名 富士写真光機株式会社